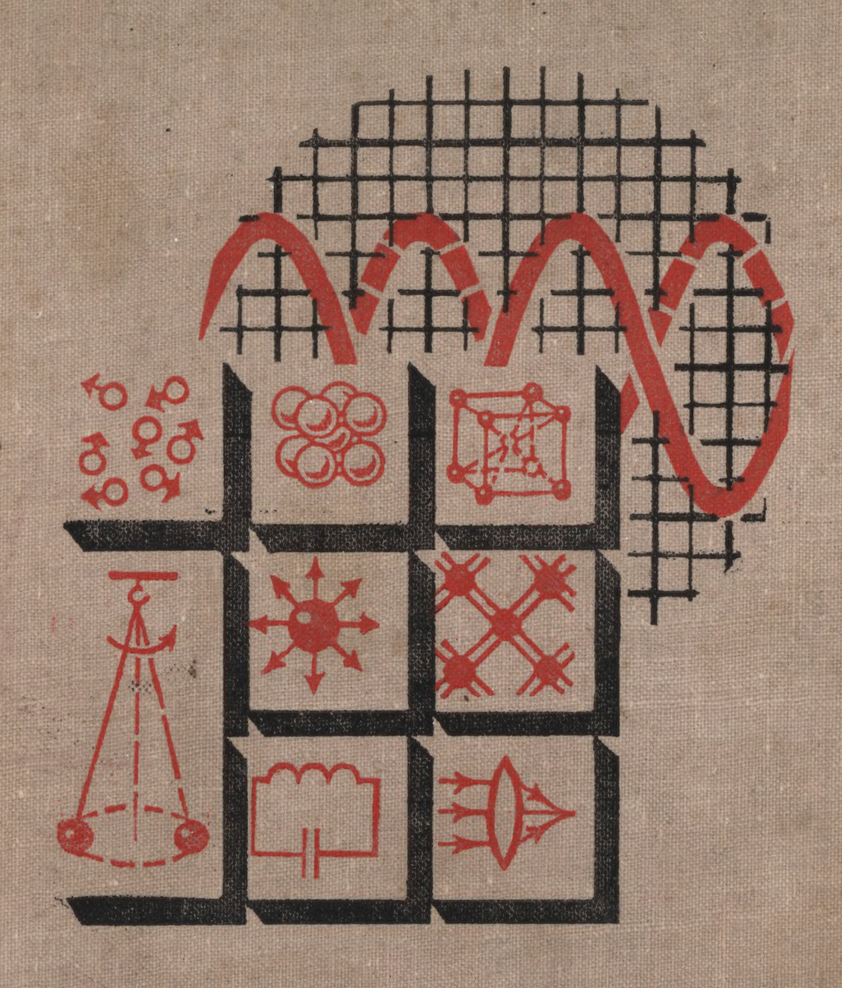
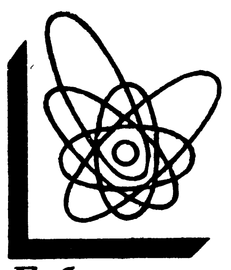
Библиотека учителя физики



2 Методика преподавания физики 8-10



Библиотека учителя физики

Методика преподавания физики

в 8—10 классах средней школы

ЧАСТЬ 2

Под редакцией В. П. ОРЕХОВА и А. В. УСОВОЙ

МОСКВА «ПРОСВЕЩЕНИЕ» 1980

ББК 74.265.1
М54

Рекомендовано к изданию Главным управлением школ Министерства просвещения СССР

Авторский коллектив:
В П. ОРЕХОВ, А В УСОВА, С Е. КАМЕНЕЦКИЙ,
И. Г. ПУСТИЛЬНИК, Л. П. СВИТКОВ, В. В. УСАНОВ

Методика преподавания физики в 8—10 классах
М54 средней школы Ч 2/ В П Орехов, А. В. Усова, С Е Каменецкий и др ; Под ред В. П. Орехова, А В Усовой — М · Просвещение, 1980 —351 +4 л илл с , ил — (Б-ка учителя физики)

В книге рассматриваются вопросы методики изучения разделов курса физики IX и X классов («Молекулярная физика», «Электродинамика», «Колебания и волны», «Оптика», «Физика атома и атомного ядра») Большое внимание уделяется политехнической направленности изложения материала, выводам и обобщениям методологического характера

М $\frac{60501-755}{103\ (03)-80}$ подписное 4306011100 ББК 74.265.1
53

ПРЕДИСЛОВИЕ

Вторая часть «Методики преподавания физики в 8—10 классах средней школы» посвящена методике преподавания курса физики IX—X классов. По научному содержанию это наиболее сложный учебный материал. Его основу составляют важнейшие положения классической и современной физики.

В связи с этим возникает методическая задача комплексного подхода к преподаванию многих вопросов курса, освещения их с разных точек зрения: молекулярно-кинетической и термодинамической, волновой и корпускулярной, с точки зрения электронной теории и теории электромагнитного поля, механики классической и квантовой и т. д. Ведущими направлениями при этом должны быть следующие:

а) освещение экспериментальных фактов, фундаментальных опытов;

б) использование принципа историзма при изложении гипотез и теорий;

в) показ диалектического единства условий и границ применимости законов классической и современной физики, действия принципа соответствия.

Важное значение имеет методика построения учебного материала и его изложения. Большая доля учебного материала приходится на вопросы классической физики, которые имеют свою исторически обусловленную и сложившуюся логику построения, которую нельзя разрушать. Однако эти вопросы рассматриваются и с современных точек зрения. С этой целью в начале каждого раздела дается краткий обзор состояния науки физики в данной области и формулируются задачи его изучения в современном школьном курсе физики.

Во введениях к разделам и главам проводится научно-методический анализ содержания учебного материала. Особое внимание уделяется физическому эксперименту, поскольку физика должна изучаться как экспериментальная наука и ее преподавание должно «показать мощь физических методов исследования, развитие

которых приводит к величайшим открытиям, имеющим революционизирующее значение для человечества»[1].

При рассмотрении вопросов методики изучения конкретных тем школьного курса физики IX—X классов даются рекомендации по вопросам политехнического обучения, идейно-политического воспитания учащихся и формирования у них диалектико-материалистического мировоззрения, а также по вопросам связи обучения с жизнью и трудом, по методике профориентационной работы и т. д. Не все вопросы преподавания физики в IX и X классах изложены с одинаковой полнотой и в этом нет необходимости, так как в настоящее время имеется значительная методическая литература, в которой подробно излагаются вопросы методики изучения отдельных тем, решения задач, физического эксперимента. Издано большое число отечественных и зарубежных учебников для вузов и средних школ, научно-популярных книг для учащихся и т. д. Обширный материал по различным вопросам методики преподавания содержится в журналах «Физика в школе». Ссылки на рекомендуемую литературу, помещенные в пособии, призваны обратить на нее внимание читателя. Список основной литературы помещен в конце книги.

Пособие подготовлено коллективом методистов педагогических институтов. Главы и разделы написаны:

Каменецким С. Е. — Введение к разделу «Электродинамика», гл. 8—9;

Ореховым В. П. —Предисловие (совместно с Усовой А. В.), Введение к разделу «Колебания и волны», гл. 10—16, 18;

Пустильником И. Г. —Введение к разделу «Физика атома и атомного ядра», гл. 17, 19, 20, 22—24;

Свитковым Л. П. — гл. 2—4;

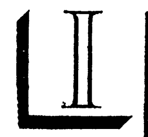
Усовой А. В. — Введение к разделу «Молекулярная физика», гл. 1, 5, 21, 25;

Усановым В. В. — гл. 6—7.

Руководство авторским коллективом и общая редакция осуществлялись В. П. Ореховым и А. В. Усовой.

---

[1] Программы восьмилетней и средней школы. Физика. Астрономия. М., 1979, с. 3.



IX КЛАСС

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

ВВЕДЕНИЕ

Разделом «Молекулярная физика» начинается курс физики IX класса. Изучение этого раздела имеет целью углубление знаний учащихся о строении и свойствах вещества и тепловых явлениях, первоначальные сведения о которых они получили в курсах физики VI и VII классов и в курсе химии VII класса. В задачу раздела входит расширение знаний учащихся о молекулах (особенностях их движения и взаимодействия); углубленное изучение молекулярно-кинетической теории газов, объяснение свойств газов на основе этой теории, изучение свойств конденсированных систем (вещества в твердом, жидком и газообразном состоянии), объяснение этих свойств на основе знаний о взаимодействии и движении молекул и атомов, углубление знаний о переходе вещества из одного агрегатного состояния в другое.

Принципиально новым для учащихся здесь является понятие о методах измерения массы, размеров и скорости движения молекул, о статистическом характере законов движения атомов и молекул, понятие о количестве вещества и единице его измерения.

Дальнейшее развитие в процессе изучения темы получают понятия «внутренняя энергия» и «температура». На основе знаний основ молекулярно-кинетической теории, формирования основных понятий и изучения количественных соотношений между величинами, характеризующими состояние идеального газа, рассматривается энергетический аспект молекулярной физики идеального газа. Рассмотрение этих вопросов играет важную роль в углублении знаний о законе сохранения и превращения энергии, иллюстрируя его применение к тепловым и механическим процессам.

В данном разделе учащиеся знакомятся с термодинамикой, объясняющей тепловые явления на макроскопическом уровне, и с молекулярно-кинетической теорией, объясняющей тепловые явления, строение и свойства тел на основе понятия о молекулах, их взаимодействии и движении.

В связи с этим при изучении данного раздела представляется возможным дать учащимся общее понятие о научной теории и ее структуре, выделить основание теории, ее ядро и следствия, показать роль теории в науке и практике, обратить внимание на то, что каждая теория имеет свою область явлений, которые она объясняет, т. е. показать ограниченность теории. Нужно показать, что по мере развития науки на смену старым теориям приходят новые, более верно и полно объясняющие сущность явлений.

Изучение раздела имеет важное значение для формирования у учащихся диалектико-материалистического мировоззрения, что обусловлено тем, что содержание его убеждает учащихся в материальности окружающего нас мира, в диалектическом характере познания, дает конкретные иллюстрации закона перехода постепенных количественных изменений в коренные качественные. Изучение свойств вещества в различных агрегатных состояниях, условий, при которых осуществляется переход из одного состояния в другое, важно для политехнического образования школьников, их подготовки к практической деятельности в сфере материального производства.

Рассматриваемый раздел является одним из наиболее сложных в методическом отношении. До сих пор отсутствует единое мнение о его структуре, о последовательности изучения тем. И в настоящее время дискутируется вопрос о том, с чего начинать изучение данного раздела: с молекулярно-кинетической теории строения вещества, объясняющей явления на основе понятий о движении и взаимодействии молекул, или с феноменологической теории — термодинамики, дающей объяснение явлений на макроскопическом уровне.

Нет единого мнения о структуре и содержании тем, в задачу которых входит ознакомление учащихся со строением и свойствами вещества в различных его агрегатных состояниях. В соответствии с ныне действующей программой по физике изучение раздела начинается с изучения основ молекулярно-кинетической теории, затем изучаются тепловые явления и газовые законы, молекулярно-кинетическая теория идеального газа, вопросы термодинамики, после чего рассматриваются свойства газов, жидкостей и твердых тел, их взаимные превращения.

Структура раздела «Молекулярная физика»

1.	Основы молекулярно-кинетической теории	5 ч
2.	Тепловые явления. Газовые законы	11 ч
3.	Молекулярно-кинетическая теория идеального газа	6 ч
4.	Первый закон термодинамики	8 ч
5.	Взаимные превращения жидкостей и газов. Свойства паров	5 ч
6.	Свойства жидкостей и твердых тел. Взаимные превращения жидкостей и твердых тел	12 ч

При изучении раздела нужно иметь в виду, что со многими понятиями, формируемыми в процессе его изучения, учащиеся

уже встречались ранее в курсах физики VI—VII классов и в курсе химии VII класса. К ним относятся понятия: «молекула», «температура», «количество теплоты», «удельная теплоемкость вещества», «внутренняя энергия тела», «теплообмен» и др. Поэтому учитель должен стремиться к тому, чтобы не дублировать то, что изучалось ранее, а развивать и углублять эти знания.

В процессе изучения раздела учащиеся должны овладеть целым рядом умений и навыков практического характера: научиться измерять температуру тел, атмосферное давление (барометром-анероидом), давление газа (с помощью манометра), рассчитывать количество теплоты, читать и строить графики зависимостей между основными параметрами, характеризующими состояние газа, решать задачи на расчет давления, объема и температуры идеального газа на основе уравнений состояния газа.

ГЛАВА 1
ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

Изучение молекулярно-кинетической теории необходимо полнее использовать для формирования у школьников материалистических убеждений и диалектического характера мышления. Приступая к изучению темы, учителю необходимо четко представить, какие новые понятия должны быть сформированы у учащихся в процессе ее изучения, какие понятия должны быть развиты и углублены, какие идеи должны быть усвоены учащимися. Новыми для них в данной теме являются понятия о методах изучения тепловых явлений — термодинамическом и статистическом и методах измерения размеров, массы и скорости движения молекул. Ознакомление учащихся с этими понятиями имеет важное значение для формирования у них убеждения в познаваемости мира, в мощи физических методов исследования, убеждения в том, что человек, вооруженный знанием, может познать свойства материальных объектов, невидимых невооруженным глазом (молекул, атомов). Существенно новым для учащихся в данной теме является понятие о статистическом характере законов движения молекул, показ принципиального различия законов движения молекул и атомов от законов движения макротел, изучавшихся в курсе физики VIII класса.

В процессе изучения темы представляется возможным познакомить учащихся с наиболее важными способами применения на практике явлений взаимодействия молекул, диффузии, броуновского движения, при этом следует акцентировать их внимание на том, что применение на практике добытых учеными знаний служит одним из важнейших подтверждений правильности этих знаний.

Примерное планирование темы может быть следующим:

1-й урок. Вводный урок к курсу физики IX класса. Механические и тепловые явления. Термодинамика и молекулярно-кинетическая теория.
2-й урок. Основные положения молекулярно-кинетической теории, их опытное обоснование. Уточнение понятия «молекула».
3-й урок. Масса и размеры молекул.
4-й урок. Броуновское движение.
5-й урок. Взаимодействие молекул.

1. ПОНЯТИЕ О МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ЯВЛЕНИЯХ. ДВА МЕТОДА ИЗУЧЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ЯВЛЕНИЙ

Первый урок по разделу «Молекулярная физика» является в то же время первым уроком по всему курсу физики, поэтому на нем необходимо вначале познакомить учащихся с задачей курса в целом (изучение разделов: «Молекулярная физика» и «Электродинамика») и с особенностью работы над усвоением материала курса. При этом следует отметить, что для изучения материала будут применяться различные методы обучения и различные организационные формы учебных занятий, что, наряду с уроками, будут проводиться учебные конференции, обобщающие лекции и семинары, фронтальные лабораторные занятия и физический практикум (в конце учебного года). Следует в самом начале занятий предупредить учащихся, что овладение курсом потребует от них самого серьезного отношения, добросовестного выполнения всех заданий, предлагаемых для классных и домашних самостоятельных работ, серьезной самостоятельной работы с учебной литературой, выполнения опытов, решения задач и т. д.

Приступая к изучению раздела «Молекулярная физика», полезно нарисовать учащимся перспективу (план) его изучения, представив с помощью плаката или кодоскопической проекции схему (план) его изучения, сообщить, что по разделу программой предусмотрено выполнение трех фронтальных лабораторных работ и восьми работ физического практикума.

Во вступительной беседе желательно, хотя бы в общих чертах, показать значение изучаемого материала для практики.

Дальнейшая задача данного урока заключается в том, чтобы раскрыть перед учащимися существенное отличие теплового движения от механического, уточнить границы применимости законов динамики Ньютона и познакомить учащихся с двумя основными способами изучения тепловых явлений — молекулярно-кинетическим и термодинамическим.

При рассмотрении отличия теплового движения от механического следует опираться на знания, полученные учащимися в курсе физики VI и VII классов. В конечном итоге учащимися должны быть четко усвоены следующие положения:

1. Классическая механика Ньютона достаточно точно описывает движение громадных космических тел, отдельных макротел и частиц. Она позволяет рассчитать, как будут двигаться эти тела или их части относительно друг друга, если известны их массы, начальные положения и силы взаимодействия между ними, но она не может объяснить возникновение сил упругости при деформации, переход веществ из одного агрегатного состояния в другое, увеличение давления газа при повышении температуры, изменение структуры и свойств тел при изменении температуры и т. д.

2. Тепловые явления подчиняются законам, отличным от законов механики Ньютона.

3. Для изучения тепловых явлений используют два метода — термодинамический и молекулярно-кинетический. Термодинамический метод основан на законе сохранения и превращения энергии.

4. Термодинамика представляет собой теорию тепловых явлений, в которой не учитывается атомно-молекулярное строение тел. Все законы термодинамики относятся к телам, состоящим из большого числа атомов и молекул, т. е. к макроскопическим телам.

Поскольку термодинамика не вскрывает сущности тепловых процессов, ее называют описательной или феноменологической теорией теплоты.

5. Второй метод изучения явлений основан на использовании молекулярно-кинетической теории строения вещества или статистической механики. Эта теория все процессы, происходящие с макротелами, объясняет исходя из предположения о том, что вещество состоит из частиц, движение которых подчинено законам механики Ньютона.

6. Знание законов, которым подчиняются тепловые явления, позволяет применять их на практике (получение сжиженных газов, создание холодильных установок и тепловых двигателей, разработка способов поддержания оптимального температурного режима в жилых и производственных помещениях, в парниках и теплицах, в животноводческих фермах и т. д.).

7. В современной науке и технике используют оба метода изучения тепловых явлений — термодинамический метод и метод статистической механики.

2. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ, ИХ ОПЫТНЫЕ ОБОСНОВАНИЯ

Первоначальное понятие о молекулярно-кинетической теории учащиеся уже получили при изучении физики и химии в VII классе. Там же они познакомились с опытами, подтверждающими ее основные положения. В курсе физики IX класса необходимо более четко сформулировать основные положения этой теории, вспомнить основные опытные их обоснования и уточнить понятие

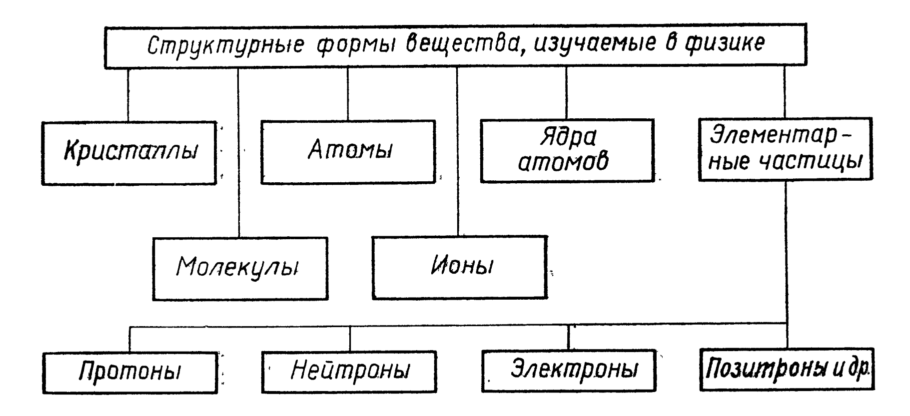


Рис. 1.1

«молекула», конкретизировать его, опираясь на знания, полученные учащимися в курсе химии VII и VIII классов.

Прежде всего следует попытаться выяснить, какое содержание вкладывают учащиеся в понятие «вещество», формирование которого у них началось в курсе физики VI и VII классов, а также в курсе химии VII и VIII классов.

Опираясь на знания учащихся о строении молекул и атомов, на первоначальное понятие об элементарных частицах, определяем вещество как вид материи, состоящий из частиц[1]. Разъясняем учащимся, что молекулы, атомы, ионы, ядра атомов, электроны, протоны, нейтроны — это все различные структурные формы вещества. Последнее необходимо подчеркнуть потому, что у учащихся часто понятие вещества ассоциируется только с молекулами. Многие из них называют веществом «то, что состоит из молекул», что неверно. Чтобы предупредить возникновение подобной ошибки, полезно разнообразие структурных форм вещества, изучаемых физикой, представить в виде схемы (рис. 1.1).

Из курса физики VII класса учащимся известно, что имеется еще один вид материи — поле. Учащиеся уже получили первоначальное понятие об электрическом и магнитном полях, знают, что электрическое поле связано с неподвижными заряженными частицами (и телами), а магнитное поле — с движущимися заряженными частицами (оно возникает, например, вокруг проводника, когда по нему проходит ток). Таким образом, в IX классе представляется возможным подчеркнуть, что вещество является лишь одним из видов материи.

Напоминаем, что вещество может находиться в твердом, жидком, газообразном состояниях и в виде плазмы — смеси положи-

[1] Масса покоя частиц вещества не равна нулю.

тельно заряженных ионов, ядер, атомов и электронов. Отмечаем, что изучение свойств вещества имеет важное практическое значение, поскольку все, что строится, конструируется, состоит из различных веществ (дома, машины, приборы, установки и т. д.). Из вещества состоят живые организмы.

Изучение строения и свойств вещества в различных состояниях чрезвычайно важно для техники и технологии производства. Важно уметь предсказывать, как будет вести себя вещество в тех или иных условиях (при заданной температуре, заданном давлении), как будут изменяться его свойства при понижении или повышении температуры до заданного значения. Не менее важно уметь объяснять наблюдаемые тепловые явления и предсказывать, как будет протекать то или иное тепловое явление в заданных условиях. Ответить на многие из этих вопросов помогает молекулярно-кинетическая теория, созданная на основе многолетних наблюдений за явлениями в природе, окружающей жизни и на основе поставленных учеными опытов.

Здесь оказывается возможным обратить внимание учащихся на структуру теории, ее основные элементы, выделив в ней: а) эмпирический базис (наблюдения и опытные факты, послужившие основой для разработки теории); б) ядро теории — ее основные понятия, положения, принципы, математический аппарат (основные уравнения); в) следствия из теории — круг явлений и свойств тел, предсказываемых и объясняемых теорией.

Далее формулируем основные положения молекулярно-кинетической теории:

1. Вещество состоит из частиц (молекул, атомов, ионов и т. д.).
2. Эти частицы непрерывно хаотически движутся.
3. Частицы взаимодействуют друг с другом.

Затем учащимся предлагаем вспомнить опытные доказательства каждого из положений, с которыми они уже познакомились в VI и VII классах. Наряду с фактами, наблюдаемыми в повседневной жизни, на основе которых еще древними натурфилософами были сделаны выводы о существовании мельчайших частиц вещества (атомов), их движении и взаимодействии, и опытами, демонстрировавшимися на уроках [13, с. 13], следует привести современные опытные данные. Вначале они лишь перечисляются, затем, на последующих уроках (4-м и 5-м), раскрываются более детально. На данном уроке рассматриваем прежде всего опытные данные, свидетельствующие о делимости вещества и объективном (реальном) существовании частиц (молекул и атомов), из которых состоят все окружающие тела. В реальном существовании молекул и атомов убеждает прежде всего возможность видеть крупные молекулы в электронный микроскоп и возможность видеть отдельные атомы с помощью ионного микроскопа (или микропроектора). С принципом действия ионного микропроектора учащиеся могут познакомиться на уроке самостоятельно по учебному пособию. В нем приведена фотография, на которой показана картина расположения

отдельных атомов вольфрама на кончике иглы, полученная с помощью ионного микропроектора.

В связи с этим можно сообщить учащимся, что в конце XIX в. многие ученые сомневались в реальном существовании атомов и молекул; например, Людвиг Оствальд говорил, что «атомы будут существовать только в пыли библиотек». Полезно напомнить также, что первым ученым, установившим два рода частиц — «корпускулы» (молекулы) и «элементы» (атомы), — был Михаил Васильевич Ломоносов (1711—1765). По его гипотезе корпускулы однородны, если состоят из одинакового числа одних и тех же элементов, соединенных одинаковым образом. Корпускулы разнородны, когда элементы их различны и соединены различным образом или в различном числе; от этого зависит бесконечное разнообразие тел. Ломоносов первым высказал мысль, что тепловые явления обусловлены механическим движением материальных частиц. Движением частиц он объяснял и упругость газов.

Необходимо уточнить понятие молекулы. В курсе химии VII класса молекулы определялись как мельчайшие частицы вещества, обладающие всеми химическими свойствами данного вещества. В IX классе следует дать более строгое определение этого понятия: молекулами называются такие мельчайшие замкнутые атомные постройки, каждая из которых имеет свойства слагаемого ими вещества.

Заслуживает обсуждения вопрос о модели молекулы. Важно подчеркнуть, что молекула не обладает теми же физическими свойствами, которыми обладает макроскопическая система как совокупность молекул. Температура, давление, вязкость, теплопроводность и многие другие свойства тел — это свойства совокупности молекул. Агрегатные состояния вещества характеризуют состояние совокупности молекул, но не отдельных молекул. Для пояснения этой мысли можно указать, что подобно тому, как одно дерево не составляет леса, так и отдельные молекулы, составляющие макроскопическое тело, не обладают свойствами этого тела.

В настоящее время молекулу принято определять как наименьшую частицу вещества, обладающую химическими свойствами данного вещества. Тем самым утверждается, что химические свойства молекул совпадают с химическими свойствами вещества. Однако следует проявлять известную осторожность в отношении этого утверждения. Молекулы — носители химических свойств вещества, но едва ли правомерно считать, что их химические свойства тождественны с химическими свойствами вещества. Последнее понятие неприменимо к взаимодействию двух молекул. Быть может, целесообразно воздержаться от определения молекулы и ограничиться, в зависимости от решаемой задачи, той или иной ее моделью — материальной точкой, упругим шариком, системой связанных материальных точек.

Модель молекулы учащиеся должны воспринимать лишь как механическую аналогию, как образ молекулы. Разнообразие моделей молекулы, используемых для объяснения свойств вещества, служит свидетельством многогранности свойств молекул, обязывает оценивать наши знания о молекулах как этап в познании.

На факультативных занятиях можно сообщить учащимся, что современная наука, пользуясь радиоспектроскопическим методом, может определять структуру молекул, характер расположения в них атомов. Радиоспектроскопическим методом, например, установлено, что молекула аммиака имеет форму трехгранной пирамиды, в основании которой расположено три атома водорода, а в вершине — атом азота. Угол между гранями при вершине составляет 106°17′.

3. МАССА И РАЗМЕРЫ МОЛЕКУЛ. ОТНОСИТЕЛЬНАЯ МОЛЕКУЛЯРНАЯ МАССА. КОЛИЧЕСТВО ВЕЩЕСТВА

Первоначальное представление о размерах молекул и об одном из способов их определения ученики получили в VI классе. В IX классе их знакомят с новым для них методом измерения размеров атомов с помощью ионного микропроектора. Этот вопрос достаточно четко изложен в учебном пособии, поэтому желательно предложить учащимся познакомиться с этим методом по учебнику самостоятельно. Не вызывает методических затруднений и определение массы молекулы на основе таких понятий, как «объем газа» и «плотность газа», «число Лошмидта».

Понятие «относительная молекулярная масса» вводится на основе анализа результатов вычисления массы одной молекулы воды [2, с. 9]. Эта масса оказывается очень маленькой: порядка 10^{-23} г. Поэтому в расчетах удобнее использовать не абсолютные значения масс, а относительные. Учащимся уже известно, что по международному соглашению массы всех атомов и молекул сравнивают с 1/12 массы атома углерода. В этом случае относительные массы атомов оказываются более близкими к целым числам. При этом получается углеродная шкала.

Напоминают, что *относительной молекулярной (или атомной) массой* вещества M_r называется отношение массы молекулы (или атома) m_0 данного вещества к 1/12 массы m_{0C} атома углерода:

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_{0C}}. \quad (1)$$

Внимание учащихся обращают на то, что величина M_r не имеет наименования.

Затем дают понятие о *количестве вещества*, отмечая, что в молекулярной физике — это вторая основная величина (первая — температура).

Под количеством вещества понимают «физическую величину, определяемую числом специфицированных структурных элементов или групп этих элементов»[1].

За единицу количества вещества принят моль. «Моль — количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в нуклиде ^{12}C массой 0,012 кг»[2].

Следует разъяснить, что при применении единицы «моль» структурные элементы должны быть специфицированы и могут быть атомами, молекулами, ионами, электронами и другими частицами или специфицированными группами частиц. Число атомов в нуклиде ^{12}C массой 0,012 кг, называемое числом Авогадро, равно $(6{,}02252 \pm 0{,}00028) \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$. «Такое же число молекул находится в 1 моль O_2, N_2, CO_2; такое же число ионов—в 1 моль Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, Cl^-, HCO_3^-; в 1 моль полиэтилена с относительной молекулярной массой 10 000 ... 1 000 000 содержится N макромолекул»[3].

Нужно обратить внимание учащихся на необходимость различать две величины: безразмерную, относительную молекулярную массу M_r и молярную массу M, измеряемую в килограммах на моль (кг/моль).

Молярная масса M представляет собой массу вещества, взятого в количестве 1 моль. Согласно этому определению молярная масса равна произведению массы одной молекулы m_0 на число Авогадро:

$$M = m_0 N_A. \qquad (2)$$

Подставив в (2) выражение m_0 из (1) и учитывая, что $N_A = 6{,}02 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$, получаем:

$$M = M_r \frac{1}{12} m_{0C} \frac{0{,}012}{m_{0C}},$$

или окончательно:

$$M = 10^{-3} M_r, \qquad (3)$$

где M — молярная масса, кг/моль; M_r — относительная молекулярная масса вещества.

В учебнике приводится пример расчета молярной массы углекислого газа CO_2. В качестве упражнений можно предложить учащимся рассчитать молярную массу воды, кислорода.

По молярной массе и числу Авогадро можно вычислить массу одной молекулы:

$$m_0 = \frac{M}{N_A}.$$

---

[1] Стоцкий Л. Р. Количество вещества. — Физика в школе, 1973, № 2, с. 97.

[2] Там же.

[3] Там же.

4. ДИФФУЗИЯ. БРОУНОВСКОЕ ДВИЖЕНИЕ

Понятие о диффузии учащимся знакомо из курса физики VI класса. В IX классе это понятие следует уточнить, опираясь на различные варианты опытов, описанных в учебной и методической литературе [2; 13; 52; 56].

Необходимо внимание учащихся обратить на то, что во всех подобных случаях имеет место проникновение молекул (атомов, ионов) одного вещества между молекулами (атомами, ионами) другого вещества.

Чтобы предупредить возникновение у учащихся неверного представления о том, что диффузия — явление, наблюдаемое лишь в лабораторных условиях, нужно привести примеры широкого использования этого явления в технике и раскрыть его роль в природе, в повседневной жизни.

Прежде всего нужно обратить внимание на важную роль диффузии в природе: перемешивание компонентов атмосферного воздуха при отсутствии конвекционных потоков (ветра) осуществляется с помощью диффузии. Диффузия играет важную роль в питании растений: необходимые для питания растений микроэлементы поступают из почвы через корневую систему благодаря диффузии. На диффузии основано соление и маринование овощей, изготовление компотов и варений.

Диффузия широко используется в технике для повышения жаростойкости, твердости и прочности деталей машин. Так, например, для повышения твердости и износоустойчивости деталей машин осуществляют так называемую цементацию, сущность которой заключается в том, что детали помещают в ящики, наполненные порошкообразным углеродом, затем помещают в термическую печь и выдерживают в ней определенное время. Молекулы углерода проникают между атомами (молекулами) поверхностного слоя стальной детали, образуя слой цементита. Чем выше температура печи и время выдержки деталей в ней, тем больше глубина науглероженного слоя металла.

К уроку можно приготовить шлифы деталей из расчета на каждую парту. Если учащимся дать лупы, они смогут визуально наблюдать темный слой (кольцо), составляющий своего рода «оболочку» детали.

В качестве домашнего задания можно предложить учащимся подобрать примеры использования диффузии в технике, в частности, в металлургии. Одному из учащихся желательно поручить подготовку по этому вопросу доклада[1].

При изучении броуновского движения недостаточно ограничиться объяснением явления, как это сделано в учебном пособии по физике для IX класса [2]. Необходимо проиллюстрировать объяснение с помощью демонстрации модели броуновского движения

---

[1] См.: Лапотышкин Н. М. В мире сплавов. М., 1973.

в теневой проекции [57, ч. 1, опыт 51], где кусочек резиновой пробки имитирует частицу, находящуюся в растворе жидкости, а дробинки — молекулы. Модель позволяет учащимся составить наглядное представление о сущности явления. Желательно также продемонстрировать явление с помощью микропроекции на экран, при этом следует иметь в виду, что движение частичек, находящихся во взвешенном состоянии в жидкости, заметно, если они имеют поперечник порядка нескольких микрометров, а для частичек, поперечник которых меньше 1 мкм, движение становится весьма оживленным.

Явление, открытое английским ботаником Броуном в 1827 г., получило свое окончательное объяснение только после опытов французского ученого Ж. Перрена (1870—1943), выполненных с большой тщательностью, исключавшей влияние всякого рода внешних воздействий, которые могли бы вызвать толчки молекул (сотрясения, конвекционные потоки и т. п.).

Молекулярно-кинетическая теория броуновского движения была создана в 1905 г. выдающимся физиком XX столетия, создателем теории относительности, Альбертом Эйнштейном, столетие со дня рождения которого 14 марта 1979 года отмечало все прогрессивное человечество. Важную роль в объяснении причин броуновского движения сыграли также работы польского физика М. Смолуховского (1872—1917), относящиеся к 1905—1909 гг.

Броуновское движение является одним из решающих доказательств вечного движения молекул. В этом заключается прежде всего научное значение его открытия и изучения. Оно явилось таким опытным фактом, который позволил установить не только факт беспорядочного (хаотического) движения молекул, но и сам факт их существования, так как импульсы (удары) частице, находящейся во взвешенном состоянии, могут сообщать только более мелкие частицы (молекулы), из которых состоит сама жидкость. Именно они, обладая массой и скоростью, сообщают частице импульс $\vec{p} = m\vec{v}$.

Следует сообщить учащимся, что наблюдения за броуновским движением частиц показали, что интенсивность броуновского движения зависит от температуры. Чем выше температура жидкости, тем интенсивнее броуновское движение. Такое беспорядочное движение совокупности частиц получило название теплового движения.

На факультативных занятиях учащимся можно сообщить, что количественные законы броуновского движения установили А. Эйнштейн (1905 г.) и М. Смолуховский (1909 г.). Эйнштейн доказал, что средний квадрат перемещения частички в определенном направлении $(\overline{\Delta x})^2$ пропорционален времени t, причем коэффициент пропорциональности равен удвоенному коэффициенту диффузии D:

$$(\overline{\Delta x})^2 = 2Dt. \qquad (4)$$

Опытная проверка соотношения (4) Ж. Перреном и другими исследователями подтвердила его справедливость и послужила основанием для нового определения числа Авогадро.

Учащиеся должны понять, что опытное подтверждение закона Эйнштейна показало правильность взглядов кинетической теории на природу теплового движения вещества.

Полезно рассказать учащимся и о практическом учете броуновского движения.

С движением систем чувствительных измерительных приборов, вызванным броуновским движением, приходится считаться всякий раз, когда энергия, передаваемая в процессе измерений от исследуемой системы измерительному прибору, равна по порядку величины kT.

5. СИЛЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОЛЕКУЛ. СТРОЕНИЕ ГАЗООБРАЗНЫХ, ЖИДКИХ И ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Первоначальное понятие о силах взаимодействия молекул учащиеся получили в курсе физики VI класса, там познакомились они и с опытами, подтверждающими действие этих сил или иллюстрирующими их проявления: сцепление свинцовых цилиндров, прилипание стеклянных пластинок к поверхности жидкости [57, ч. 1, опыт 55]. Взаимное отталкивание молекул демонстрировалось при сжатии газов, жидкостей и твердых тел. В курсе физики IX класса решается задача дальнейшего развития понятия о силах молекулярного взаимодействия: выясняется характер действия этих сил, их природа, проявления, изучается зависимость сил притяжения и отталкивания от расстояния между молекулами; на основе понятия о силах взаимодействия и их зависимости от расстояния объясняется строение газообразных, жидких и твердых тел. Все эти вопросы достаточно четко изложены в учебном пособии по физике для IX класса [2, с. 12—16].

При изучении сил взаимодействия молекул зависимость изменения сил притяжения и отталкивания иллюстрируется графически [2, рис. 7, 8]. Учащиеся должны хорошо усвоить, что при расстоянии r_0, равном примерно сумме радиусов молекул (атомов), равнодействующая сил отталкивания и притяжения равна нулю (сила притяжения по модулю равна силе отталкивания). При $r > r_0$ сила притяжения превосходит силу отталкивания. При r, превышающем 2—3 диаметра молекул, сила отталкивания практически равна нулю. При уменьшении расстояния сила притяжения возрастает и одновременно начинает проявляться действие силы отталкивания, но при $r < r_0$ сила отталкивания увеличивается быстрее, чем сила притяжения. Это наглядно представлено на рисунке 7 учебного пособия. При $r \to \infty$ равнодействующая сил стремится к нулю.

Желательно сообщить учащимся, что впервые силы «сцепления» между молекулами были измерены советскими учеными. В

опытах измерялась сила взаимодействия между пластинкой и сферической линзой из плавленого кварца. При $R_л = 10$ см и ширине щели между линзой и пластинкой 0,3 мкм сила притяжения составляла приблизительно 0,00001 Н; при зазоре в 0,1 мкм сила равнялась 0,0002 Н. (Для сравнения: капля воды давит на лист с силой 0,1 Н.)

Желательно рассмотреть на уроке, как силы молекулярного взаимодействия используются на практике. Прежде всего нужно обратить внимание учащихся на то, что действие сил притяжения между молекулами положено в основу создания различных клеев. Ученые научились создавать такие клеи, которые позволяют склеивать самые различные материалы: бумагу, ткани, фарфор, стекло, дерево и даже металлы. Стальные балки, соединенные с помощью особого клея, удерживаются лучше, чем балки, соединенные электросваркой. Желательно к уроку приготовить коллекцию клеев.

Внимание учащихся нужно обратить на то, что зависимость сил притяжения между молекулами от расстояния между ними используется и учитывается в порошковой металлургии и металлокерамике. В основу процесса образования новых металлов из порошков положены зависимость скорости движения молекул (атомов) от температуры и увеличение сил притяжения между ними при сжатии порошка под давлением. Применяя высокое давление и высокую температуру, советский ученый И. И. Китайгородский получил новый искусственный камень микролит. Резцы из микролита начинают находить широкое применение.

Рассмотрение зависимости сил притяжения и отталкивания между молекулами является необходимым условием для подготовки учащихся к изучению строения жидких, газообразных и твердых тел. Именно на этой основе представляется возможным качественно объяснить различие свойств вещества в газообразном, жидком и твердом состояниях. Поскольку этот вопрос достаточно четко изложен в учебном пособии [2, с. 14—16], можно предложить учащимся изучить его самостоятельно. Результаты самостоятельной работы должны быть проверены и обсуждены на уроке.

ГЛАВА 2

ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ. ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

Данная тема призвана осветить одну из глав термодинамики, без знания которой нельзя изложить последующий программный материал — молекулярно-кинетическую теорию равновесного состояния разреженного газа. В теме изучаются опытные знания, являющиеся (наряду с принципами) основой термодинамики: важнейшие понятия (система, параметры системы, процесс), так называемое «нулевое начало», позволяющее ввести понятие о тем-

пературе как параметре равновесного состояния системы (закон теплового равновесия), опытные газовые законы, дающие возможность получить уравнение состояния газа.

На изучение темы программой отводится 11 ч. Это время может быть распределено по урокам следующим образом:

1-й и 2-й уроки.	Основные понятия, необходимые для описания тепловых явлений: «система», «параметры системы», «процесс», «тепловое равновесие», «температура».
3-й и 4-й уроки.	Газовые законы.
5-й урок.	Решение задач на газовые законы.
6-й урок.	Лабораторная работа «Опытная проверка закона Бойля—Мариотта».
7-й урок.	Газовый термометр. Абсолютная температура.
8-й урок.	Уравнение состояния газа.
9-й урок.	Решение задач на уравнение состояния.
10-й урок.	Лабораторная работа «Проверка уравнения состояния газа».
11-й урок.	Повторение и обобщение материала темы.

1. СИСТЕМА. СОСТОЯНИЕ СИСТЕМЫ. ПРОЦЕСС

Система (*термодинамическая система*) — одно из первоначальных понятий темы. Этим понятием обозначается объект исследования термодинамики.

Термодинамика исследует не любые тела, а только макроскопические — тела, размеры которых, с одной стороны, должны быть достаточно большими по сравнению с размерами микрочастиц, а с другой стороны, они не должны быть бесконечно большими. Можно считать, что термодинамика исследует тела, размеры которых привычны для человека по его повседневному опыту.

Сообщаем, что системой (термодинамической системой) мы будем называть любое макроскопическое тело (или совокупность тел), свойства которого (которых) мы собираемся исследовать.

Наряду с понятием «система» вводим понятие «внешние тела». Внешними телами называют тела, не включаемые в систему тел, выделенную для исследования. Тем самым точно определяются границы системы.

Определение системы и ее границ должно быть первым шагом при решении задач термодинамики, без этого не может быть применено первое начало: работа и количество теплоты оцениваются на границах системы, определяются энергией, переходящей через границу к системе или от системы.

Систему, не взаимодействующую с внешними телами, определяют как изолированную; систему, взаимодействующую с внешними телами, называют неизолированной.

Формированию понятия «состояние системы» надо уделить особое внимание: для учащихся оно не является достаточно простым.

Термин *состояние* учащимся известен из курса механики (VIII класс). В механике состояние тела определялось совокупностью координат, задающих положение тела в той или иной системе отсчета, и импульсов (скоростей). Аналогично определяют состояние системы в термодинамике: состояние термодинамической системы задается совокупностью измеримых физических величин, называемых *параметрами состояния.*

Число параметров, определяющих состояние системы, зависит от рассматриваемой системы и от условий, в которых она находится. В простейшем случае, когда в качестве системы рассматривается однородный газ, находящийся вне электрического поля, параметрами состояния оказываются давление, удельный или молярный объем и температура.

Параметры системы — это измеримые физические величины, характеризующие те или иные свойства системы. Важно, что некоторые из параметров зависят только от свойств системы. Эти параметры называют внутренними. К ним относятся, например, температура, давление. Другие параметры зависят от внешних условий. Например, объем газа в цилиндре под поршнем зависит от координат (от положения) поршня. Параметры, определяющие в числе прочих состояние системы, но зависящие от координат внешних тел, называют внешними параметрами. Объем газа, следовательно, — это внешний параметр газа как системы. Деление параметров системы на внешние и внутренние важно для точного определения таких понятий, как «теплота» и «работа».

С понятием «состояние системы» связаны понятия «равновесное, или статическое, состояние» (состояние, в котором при отсутствии внешних воздействий параметры системы со временем не меняются) и «неравновесное, или нестатическое, состояние» (состояние, в котором параметры меняются).

Внимание учащихся обращают на то, что равновесное состояние графически изображается точкой (на плоскости в координатах p, V; p, t или в пространстве в координатах p, V, t — рис. 2,1), а неравновесное состояние графически не изображается.

Понятие «процесс» учащимися усваивается обычно без особых затруднений. Определяют процесс как переход системы из одного состояния в другое. Для газа, например, процесс — это переход из состояния, определяемого параметрами p_1, V_1, t_1, в состояние, определяемое параметрами p_2, V_2, t_2. При этом один из параметров может оставаться постоянным. Процессы, в которых один из параметров газа остается постоянным, называют простейшими.

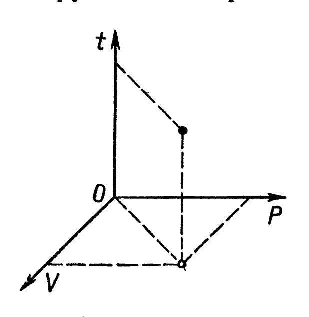


Рис. 2.1

Многовековой опыт убеждает в том, что изолированная термодинамическая система со временем приходит в равновесное состояние, из которого самопроизвольно вый-

ти не может. Время, за которое система из неравновесного состояния переходит в равновесное, называют *временем релаксации*. Значение этого времени зависит от степени неравновесности системы и от свойств самой системы. Время релаксации служит мерой достаточной медленности или достаточной быстроты протекания процессов. Этим обстоятельством и обусловлена необходимость введения данного понятия.

Рис. 2.2

Если начальное состояние системы было равновесным, то процесс возможен только в результате взаимодействия системы с внешними телами. При этом возможно такое взаимодействие, при котором изменения параметров системы заметным образом не нарушают равновесия. В этом случае систему с известным приближением можно в течение всего процесса считать как бы равновесной. Если это условие выполняется, то процесс называют *равновесным*.

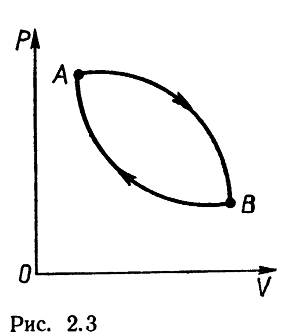


Рис. 2.3

Понятие о равновесном процессе — одно из основополагающих в термодинамике, на это понятие опирается большинство ее умозаключений. Отмечают, что равновесный процесс графически изображается линией (рис. 2.2). Неравновесный процесс графически изобразить нельзя.

Затем вводят понятие о *круговом процессе — цикле*. Цикл определяют как процесс, для которого конечное и начальное состояния совпадают. Рассматривают примеры круговых процессов, изображаемых, например, в координатах p, V (рис. 2.3). Сообщают, что понятие о цикле — одно из важнейших в термодинамике: анализ равновесных круговых процессов позволяет сформулировать целый ряд весьма важных закономерностей, выводов. По этой причине метод рассуждений, использующий понятие о круговом процессе, называют методом круговых процессов. Поскольку он разработан Карно и Клаузиусом, нередко его называют методом Карно—Клаузиуса.

2. ТЕПЛОВОЕ РАВНОВЕСИЕ

Обычно, говоря о принципах термодинамики, имеют в виду первое и второе начала. Однако не меньшее значение в этой теории имеет закон теплового равновесия. Этот закон так же, как и два начала термодинамики, представляет собой обобщение данных опыта.

На законе теплового (термического) равновесия основана возможность измерения температуры.

Опыт показывает, что два различно нагретых тела, приведенные в тепловой контакт друг с другом, в конечном итоге приходят в равновесное состояние. Эмпирическим путем установлена транзитивность теплового равновесия: если два тела порознь находятся в тепловом равновесии с одним и тем же третьим телом, то они находятся в тепловом равновесии и друг с другом. Это положение — один из краеугольных камней термодинамики.

Учащиеся должны оценить закон теплового равновесия как обобщение данных опыта. Однако надо пояснить, что в обобщении содержится нечто большее, чем то, что дает опыт: данные наблюдений за n изолированными системами обобщаются, экстраполируются на все изолированные, в том числе и на неисследованные, системы.

3. ТЕМПЕРАТУРА

В практике преподавания физики понятию температуры по традиции уделяется мало внимания. Принято считать, что все знакомы с этим понятием чуть ли не с дошкольного возраста. Однако опыт показывает, что многие учащиеся не знают правила измерения температуры. Значительная часть учащихся считает, что перед измерением температуры термометр надо встряхнуть. Серьезные затруднения испытывают учащиеся в определении цены деления шкалы термометра. О статистическом толковании температуры учащиеся, как правило, не имеют представления. На вопрос: «Можно ли измерить температуру одной молекулы?» — большинство учащихся отвечает утвердительно.

В термодинамике *температура* служит одним из параметров равновесного состояния системы. Учащиеся должны хорошо усвоить следующие правила измерения температуры: 1) для измерения температуры нужно выждать время, пока уровень столбика жидкости в термометре не перестанет перемещаться; 2) при отсчете показаний термометра резервуар с термометрическим веществом должен находиться в той среде, температуру которой мы измеряем. Эти правила обусловлены тем, что температура — параметр равновесного состояния; чтобы судить о температуре той или иной системы, необходимо, чтобы система и термометрическое вещество термометра находились в состоянии теплового равновесия. Только в этом случае можно говорить о той или иной температуре термометрического вещества, а следовательно, и о температуре системы, с которой термометр находится в тепловом контакте.

Важно иметь в виду, что температура как свойство термодинамической системы существенно отличается от других свойств системы, таких, например, как масса, объем, энергия. Масса, объем и энергия аддитивны, температура не аддитивна. Температура системы не равна сумме температур частей системы.

Эту особенность температуры важно знать, так как ею объясняется тот факт, что температуру измеряют не путем сравнения ее с эталоном, как измеряют, например, длину, объем, массу, а на основе связи между температурой и одним из экстенсивных параметров. Об изменении температуры судят, например, по изменению объема термометрического вещества. Эталон для измерения температуры невозможен, так как бессмысленно пытаться установить, сколько раз одна температура содержится в другой.

О температуре как о числовой характеристике степени нагретости тела можно говорить только после выбора шкалы температур. Но выбор температурной шкалы произволен. В качестве меры температуры могут быть выбраны различные параметры, однозначно изменяющиеся с изменением температуры, — объем, давление, проводимость, яркость и др. В каждом случае получаются различные шкалы температур. Произволен и выбор основных реперных (постоянных) точек шкалы и масштаба (размера) градуса.

Учащиеся, чтобы правильно понимать вопрос о температуре, должны знать о произвольных допущениях (соглашениях), которые следует принять, чтобы иметь термометрическую шкалу, чтобы иметь возможность характеризовать температуру числом.

Говорить о температуре, не соотнося ее с какой-то определенной шкалой, с определенным образом сконструированным прибором для ее измерения, бессмысленно. Определение температуры, обычно даваемое на уроках физики, должно быть дополнено. Температура — не просто степень нагретости тела, но степень нагретости по определенной шкале температур.

Анализ существа вопроса показывает, что понятие температуры для учащихся не может быть определено сразу. Формировать это понятие следует поэтапно.

На первом этапе (VI—VII классы) учащиеся на основе известных наблюдений о существовании более или менее нагретых тел, об охлаждении более нагретых тел при контакте с менее нагретыми (нагревании холодных тел при контакте с более нагретыми) убеждаются в том, что тела обладают свойством, обнаруживаемым нами как степень нагретости; это свойство называют температурой. Таков первый шаг введения понятия температуры, дающий лишь представление о существовании некоторого свойства тел. В IX классе введение понятия температуры необходимо увязать с опытным законом теплового равновесия и определить температуру как параметр равновесного состояния системы, как свойство системы, обусловливающее передачу теплоты от одного тела (более нагретого) к другому (менее нагретому) при тепловом контакте этих тел.

Следующий шаг — конструирование прибора для количественного измерения температуры. Полезно процитировать следующие слова Томсона (Кельвина): «В физических науках первым важным шагом в деле познания какого-либо процесса является установление численных соотношений и отыскание практических методов измерения тех элементов, которые связаны с данным явлением.

Если вы можете измерить то, о чем вы говорите, и выразить это в числах, вы познали уже кое-что в рассматриваемом явлении; если же вы не можете его измерить и выразить в числах, то все ваши познания скудны и мало удовлетворительны»[1].

Учащимся предлагают следующие вопросы: «Как измеряют длину? массу? площадь? объем?» Ответ: «Все эти величины измеряют путем сравнения их с эталоном — с длиной, с массой, с объемом, принятыми за единицу». Для измерения температуры такой эталон определить нельзя: температура — не аддитивное свойство системы.

Учащиеся знают, что о температуре обычно судят по объему термометрического вещества. Какие есть основания для такого суждения? Только данные опыта, свидетельствующие о том, что при нагревании все тела расширяются, а при охлаждении сжимаются. Чтобы построить термометр, предполагают, что объем тела, например ртути, изменяется пропорционально температуре. Так ли это на самом деле — мы ответить не можем, но принимаем, что это так. Без этого нельзя построить термометр. Но, приняв это предположение, можно построить любую шкалу температур, задав определенное значение температуры для двух определенных состояний термометрического вещества. Приписав равновесному состоянию ртути при контакте с тающим льдом при нормальном атмосферном давлении нуль градусов, а равновесному состоянию ртути при контакте с парами кипящей воды при том же давлении 100 градусов, получают шкалу Цельсия. Если температуру тающего льда принять за 32 градуса, а температуру кипящей воды за 212 градусов, то получится шкала Фаренгейта. Построенные так шкалы температур называются эмпирическими.

Напоминаем, что для измерения температуры применяют разные термометрические вещества — ртуть, спирт — и что шкалы температур при этом оказываются тоже разными: показания ртутного и спиртового термометров совпадают только в двух опорных точках. Во всех промежуточных и прочих точках шкалы показания термометров не совпадают. Обращаем внимание на то, что в принципе любая из этих шкал может быть принята за стандарт, что «истинной» температуры, не зависящей от нашего произвола в выборе шкалы, не существует. Поэтому температура, выражаемая числом, есть степень нагретости тела по определенной шкале. Изложение материала поясняем сопоставлением шкал Цельсия и Фаренгейта (рис. 2. 4).

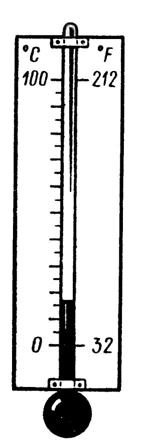


Рис. 2.4

Измерение температуры на основе связи ее с объемом термометрического тела — лишь один из возможных способов построения температурной шка-

[1] Цитируется по кн.: Курепин Ф. К. Физика для энергетиков. М. — Л., 1933, с. 133—134.

лы. В качестве термометрического параметра может быть выбрано любое другое экстенсивное свойство тел, однозначно изменяющееся с изменением температуры. При изучении электродинамики в IX классе учащиеся узнают о существовании термометров, в которых термометрическим телом является термистор (для измерения температуры используется зависимость проводимости полупроводников от температуры — о температуре судят по значению силы тока, проходящего по цепи с термистором). На уроках астрономии в X классе учащимся сообщают о том, что температура звезд может быть измерена оптическим пирометром — прибором, температурная шкала которого построена на основе зависимости яркости нагретого тела от температуры.

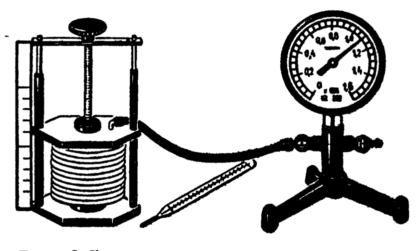
В плане реализации политехнического принципа полезно ознакомить учащихся со значениями температур, встречающимися в природе и технике. Конкретный материал по данному вопросу имеется в книге А. В. Усовой и Н. С. Антроповой «Связь преподавания физики с сельскохозяйственным производством» [78], в справочнике по физике А. С. Еноховича [26].

4. ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

Экспериментальное исследование свойств газов исторически предшествовало становлению термодинамики как теории и подготовило необходимые опытные данные для ее развития. В частности, из опытных законов получают уравнение состояния газа — функциональную зависимость между параметрами газа. Очевидно, кроме того, практическое значение опытных газовых законов в связи с широким применением газов в технике.

В учебном пособии по физике для IX класса [2] законы Бойля—Мариотта и Гей-Люссака изложены на основе описания опытов, а закон Шарля дан как следствие уравнения состояния. Целесообразно все эти законы получить как опытные: во-первых, ознакомление учащихся с экспериментальным методом исследования — одна из задач обучения физике, во-вторых, метод рассуждений, приведший к закону Гей-Люссака и закону Шарля, по существу, один и тот же; его повторение при изучении закона Шарля не вызовет затруднений и будет способствовать пониманию самих законов.

Изучение газовых законов начинается с закона Бойля—Мариотта: соответствующая зависимость между параметрами наблюдается на опыте непосредственно.


Рис. 2.5

Ставим задачу найти зависимость давления p от объема V газа при постоянной температуре. Объясняем учащимся, какая установка (рис. 2. 5) используется для опыта (цилиндр

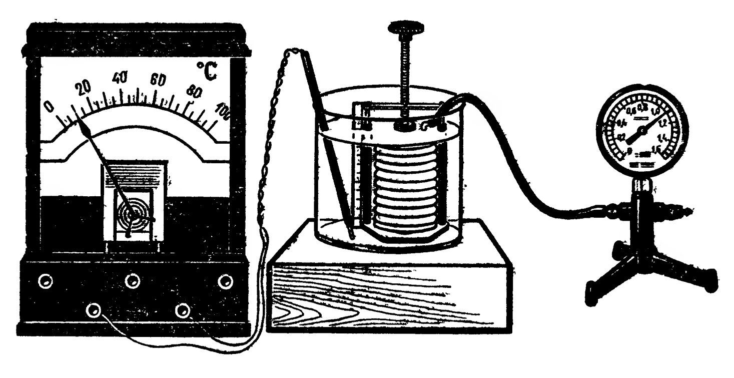


Рис. 2.6

переменного объема — сильфон, манометр, резиновый шланг [57, ч. 1, опыт 58]. Обращаем внимание на то, что объем воздуха измеряется в условных единицах. Изменяем объем воздуха, замечаем, что давление меняется. Затем на классной доске записываем показания манометра, соответствующие различным объемам. Результаты дают возможность сделать вывод, что для неизменной массы воздуха и при постоянной температуре произведение объема воздуха на его давление есть величина постоянная. Целесообразно записать закон как в форме $pV = \text{const}$, так и в форме $\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}$. Ссылаемся на опыты ученых и обобщаем результаты: формулируем закон Бойля—Мариотта для газов вообще. Вычерчиваем график зависимости давления от объема (изотерму).

Демонстрация по выводу закона Гей-Люссака может быть поставлена с помощью того же цилиндра переменного объема (рис. 2.6) с демонстрационным манометром. Цилиндр помещаем в стеклянную банку с водой, охлаждаемой перед опытом до 0 °С (для этого в воду кладут кусочки льда или снега). Затем нагреваем газ, подогревая воду в банке. Давление газа поддерживаем во время опыта постоянным, равным атмосферному (меняем объем газа). Температуру газа (воды в банке) измеряем демонстрационным термометром (гальванометр с термопарой). Воду в банке перемешиваем и записываем, какой объем газа соответствует температуре 0, 20, 40, 60 °С. Данные измерений заносим в таблицу. Затем строим график в координатах V, t (изобару). Замечаем, что объем зависит от температуры линейно.

Сообщаем, что Гей-Люссак в подобных опытах вычислял для разных газов относительное изменение объема при нагревании на 1 °С, т. е. коэффициент $\alpha = \frac{V - V_0}{V_0 t}$, называемый температурным коэффициентом объемного расширения газа. Поясняем смысл коэффициента, записывая на доске последовательно:

$V - V_0$ — изменение объема газа при изменении температуры на t;

$\frac{V - V_0}{t}$ — изменение объема газа при изменении температуры на 1 °С;

$\frac{V - V_0}{V_0 t}$ — изменение единицы объема газа при изменении температуры на 1 °С.

Используя результаты опыта, вычисляем температурный коэффициент объемного расширения воздуха: $\alpha \approx 0{,}00367 \frac{1}{°C} \approx \frac{1}{273} \frac{1}{°C}$. Сообщаем, что такое же значение этого коэффициента было получено для всех газов. Формулируем закон, записываем его в виде

$$V = V_0 (1 + \alpha t).$$

Демонстрацию по выводу закона Шарля проводим на том же оборудовании. Фиксируем объем газа, измеряем давление при разных температурах. Вводим понятие о температурном коэффициенте давления β для газа и по данным измерений давления и температуры вычисляем этот коэффициент. Формулируем закон и записываем его в виде

$$p = p_0 (1 + \beta t).$$

Обращаем внимание учащихся на то, что коэффициенты α и β одинаковы. Выражаем зависимость давления от температуры графически.

Опытные законы для газов усваиваются в IX классе сравнительно легко, однако требуется тренировка в их применении. Задачи по этой теме имеются в достаточном количестве в большинстве задачников [27, № 479—489]. С молекулярно-кинетическим объяснением газовых законов учащиеся знакомятся при изучении кинетической теории газов.

5. ГАЗОВЫЙ ТЕРМОМЕТР. АБСОЛЮТНАЯ ТЕМПЕРАТУРА

Газ как термометрическое вещество обладает следующими преимуществами для построения температурной шкалы — показания термометров с различными газами хорошо согласуются (газы расширяются при нагревании практически одинаково), в меньшей мере сказывается расширение материала, в который помещено термометрическое вещество, так как температурный коэффициент объемного расширения газа в 20 раз больше, чем ртути.

Вводим допущения для построения газовой шкалы. Для газового термометра, так же как для спиртового и ртутного, принимаем, что объем (давление) термометрического вещества (газа) зависит линейно от температуры. Так ли это на самом деле, сказать нельзя. По ртутной шкале расширение газа оказывается почти

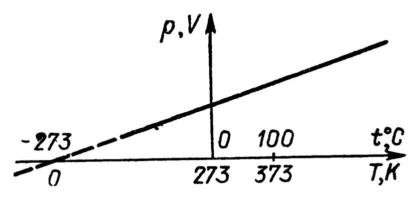


Рис. 2.7

линейным. Линейную зависимость объема (давления) газа от температуры экстраполируем в область низких температур (рис. 2.7) и вводим понятие о нуле температуры по газовой шкале: нулевой объем (давление) идеального газа будет соответствовать нулевому значению температуры. Поскольку дальнейшее уменьшение объема (давления) невозможно, более низкая температура по этой шкале также невозможна. Минимальная температура оказывается равной — 273,15 °С. После этого вводим понятие о шкале Кельвина и абсолютной температуре T. Связь температуры T по шкале Кельвина и температуры t по шкале Цельсия выражается уравнением $T = t + 273,15$.

С помощью рисунка 2.8 сравниваем шкалы Цельсия и Кельвина.

Используя шкалу Кельвина, уравнения законов Гей-Люссака и Шарля можно записать соответственно в виде

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}; \quad \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}.$$

Эти формулы в дальнейшем используются при решении задач и выводе уравнения состояния для газов.

6. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Изучение газовых законов должно убедить учащихся в том, что при изменении одного из параметров системы изменяются другие. В простейших случаях, когда заданием внешних условий один из параметров газа поддерживается постоянным, зависимости между параметрами находятся опытным путем и выражаются законами Бойля — Мариотта, Гей-Люссака или Шарля. Обращаем внимание учащихся на то, что в природе и технике часто все параметры газа изменяются одновременно. Воздух, например, поднимаясь в верхние слои атмосферы, расширяется и охлаждается, при этом его давление уменьшается. Газ, сжимаемый в цилиндре двигателя внутреннего сгорания, нагревается и давление его увеличивается. Высказываем предположение, что в подобных процессах должна существовать определенная функциональная зависимость между параметрами состояния. Сообщаем, что такая зависимость (уравнение состояния) была найдена Б. Клапейроном на основании опытных законов, что в изучении свойств газов уравнение состояния играет не менее важную роль, чем уравнение, выражающее второй

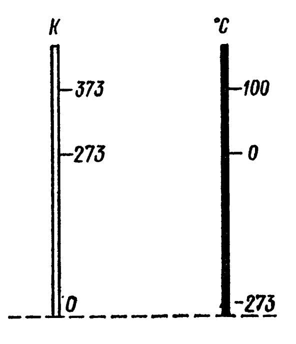


Рис. 2.8

закон Ньютона, в механике. Затем переходим к выводу уравнения.

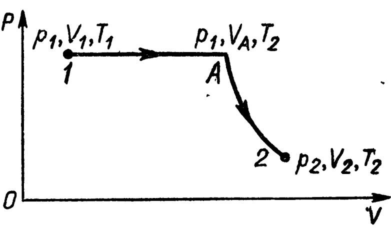


Рис. 2.9

Способы получения уравнения состояния для газов из опытных законов сводятся к рассмотрению перехода газа из одного состояния с параметрами p_1, V_1, T_1 в другое состояние с параметрами p_2, V_2, T_2 посредством двух процессов — изотермического и изобарного или изотермического и изохорного. С какого из двух выбранных процессов начинать описание перехода — не имеет значения. Важно при этом иллюстрировать объяснение графиками процессов перехода из первого состояния во второе, например, в координатах p, V.

На рисунке 2.9 графически показан путь перехода газа из состояния *1* в состояние *2* посредством изобарного и изотермического процессов. Записываем уравнения соответствующих газовых законов для этих процессов. Для изображенного на рисунке процесса перехода из состояния *1* в промежуточное состояние *A* имеем: $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_A}{T_2}$, а для изотермического процесса — соответственно: $p_1 V_A = p_2 V_2$.

После умножения первого уравнения на второе и сокращения на V_A получаем уравнение $\frac{V_1 p_1}{T_1} = \frac{V_2 p_2}{T_2}$, которое записываем в виде $\frac{pV}{T} = \text{const}$.

Затем обосновываем введение понятия об универсальной газовой постоянной, находим ее численное значение, записываем уравнение $pV = RT$ для 1 моль газа и уравнение $pV = \frac{m}{M} RT$ для газа произвольной массы.

На конкретных примерах (задачах) показываем, что уравнение состояния позволяет вычислить любую из пяти переменных, характеризующих газ как термодинамическую систему, если известны другие параметры.

ГЛАВА 3
МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Тема «Молекулярно-кинетическая теория идеального газа» позволяет показать учащимся способ построения физической теории, основанной на гипотезах, задающих модель (механическую аналогию) исследуемой системы, познакомить их с применением статистического метода для вычисления макроскопических свойств газа

(давление, температура, энергия), а также важнейших характеристик молекул. Теория должна быть воспринята учащимися и как научная система, и как метод исследования.

Частными познавательными задачами темы являются ознакомление учащихся с понятием «идеальный газ» и основным уравнением молекулярной теории газа; развитие понятия о температуре, введенного в курсе природоведения в IV классе и в курсе физики в VII классе (взаимосвязь температуры со средней кинетической энергией молекул).

На изучение темы программой отводится 6 ч. Рекомендуем следующее планирование материала темы:

1-й и 2-й уроки.	Модель разреженного (идеального) газа. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов.
3-й урок.	Температура с точки зрения молекулярно-кинетической теории.
4-й урок.	Опытная проверка выводов молекулярно-кинетической теории (получение опытных газовых законов, измерение скоростей молекул, энергия газа).
5-й урок.	Решение задач.
6-й урок.	Обобщение пройденного материала. Границы применимости молекулярно-кинетической теории.

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ СТАТИСТИЧЕСКОГО МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ МОЛЕКУЛ

Прежде всего необходимо показать учащимся, что основная задача молекулярной физики не может быть решена методами механики. Во-первых, потому, что нам не известны начальные состояния молекул и силы, действующие на молекулы. Поэтому мы не можем написать уравнения движения молекул. Во-вторых, для написания такого числа уравнений, которое равнялось бы числу молекул, например, в кубическом сантиметре газа при нормальных условиях, потребовалось бы время, на несколько порядков превосходящее возраст Земли. Самое же существенное заключается в том, что совокупность большого числа молекул обладает свойствами (давление, температура), которыми не обладают отдельные молекулы. Эти обстоятельства убеждают в том, что для количественного описания свойств системы молекул нужно найти методы, отличные от методов механики. Сообщаем, что такие методы были найдены. Для описания систем с большим числом частиц (с большим числом степеней свободы движения) используется математическая теория вероятностей. Метод описания, использующий теорию вероятностей, назван *статистическим методом*.

Основные понятия теории вероятностей — случайное событие (случайность численного значения величины), вероятность события, статистическое распределение, среднее значение случайной величины.

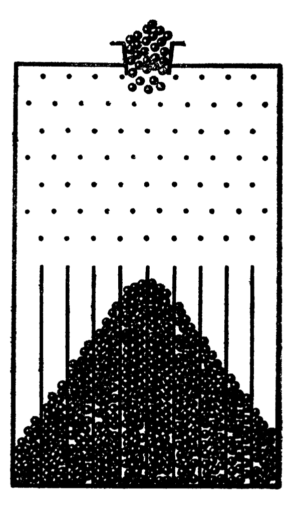


Рис. 3.1

Случайное событие можно определить как событие, которое в условиях опыта может произойти, а может и не произойти. При бросании, например, монеты выпадение той или иной стороны монеты представляет собой случайное событие. Скорость той или иной молекулы в газе, учитывая хаотичность движения молекул, также оказывается случайным событием: направление и численное значение скорости молекулы нельзя предсказать.

Понятие о вероятности события (того или иного значения случайной величины) учащиеся воспринимают без особых затруднений: жизненный опыт вырабатывает представление о вероятностном исходе большого числа результатов деятельности, явлений.

Вероятность — количественная мера возможности — может быть определена по-разному. Может быть дано так называемое «частотное» определение вероятности. При этом сначала вводится понятие о частоте $\frac{n}{N}$ появления интересующего нас события, где N — общее число случайных событий, n — число появлений интересующего события. Вероятность определяется как предел, к которому стремится частота $\frac{n}{N}$ при неограниченном увеличении общего числа N событий. Это определение, строго говоря, приемлемо лишь для системы с неизменными свойствами — предполагается возможность неограниченного повторения опыта в неизменных условиях.

Особого внимания требует введение понятия о *статистическом распределении*. Опыт с доской Гальтона (рис. 3.1) позволяет дать представление о нормальном одномерном распределении случайных величин — распределении случайных отклонений координаты дробинок (зерен, песчинок) от некоторого среднего значения. Закон нормального распределения выполняется для случайных величин, которые с равной вероятностью могут иметь как положительные, так и отрицательные отклонения от среднего значения.

В опыте с доской Гальтона учащиеся наглядно видят распределение частиц по координатам. На основании опыта можно ввести понятие о функции распределения: вероятность w распределения дробинок по координатам x оказывается зависящей от координаты x и, очевидно, прямо пропорциональна ширине отсека (ширине интервала) Δx. Математически это записывают так:

$$w = f(x)\,\Delta x,$$

где $f(x)$ — функция распределения.

Отыскание статистической функции распределения случайных величин — одна из основных задач статистики: функция распределения дает возможность вычислить среднее значение микроскопических параметров. Последнее составляет цель теории, поскольку макроскопические параметры системы выражаются через средние значения свойств совокупности молекул.

Понятие о статистическом распределении используется с первых шагов построения теории простейшей молекулярной системы — равновесного состояния разреженного газа. Для описания этой системы по существу принимаются очевидные для учащихся положения о равновероятном распределении молекул по объему и равновероятном распределении их по направлениям движения. В последующем учащиеся ознакомятся с распределением молекул газа по скоростям — с максвелловским распределением.

Понятие о среднем значении случайной величины подробно освещено в учебном пособии. Важно, однако, акцентировать внимание на том, что среднее значение случайной величины есть характеристика статистического распределения. Вычисление этого значения величины имеет смысл только для систем, подчиняющихся закону больших чисел, — только для таких систем среднее значение случайной величины имеет постоянное значение.

2. ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ГАЗОВ

Известно несколько способов получения основного уравнения молекулярно-кинетической теории газов, отличающихся степенью строгости и математической сложности. Доступен учащимся, например, такой вывод этого уравнения.

Указываем, что основным уравнением молекулярной теории газа называют уравнение, устанавливающее связь между давлением газа, числом молекул газа в единице объема и энергией движения молекул. Так как давление измеряется силой, действующей на единицу площади, задача будет состоять в том, чтобы найти силу, с которой молекулы газа действуют на единицу площади стенки сосуда, в котором находится газ.

Отмечаем, что мы рассмотрим разреженный газ (газ в условиях, близких к нормальным), находящийся в равновесном состоянии (давление и температура газа одинаковы во всех частях сосуда).

Самым первым шагом при решении задачи молекулярной теории (вычисление макроскопических параметров на основе представлений о молекулах и их движении) является выбор модели системы, параметры которой мы собираемся вычислять.

Выбрать модель газа — значит сделать некоторые предположения о свойствах молекул газа и об особенностях движения молекул. Будем считать (предполагать) следующее:

1) Газ состоит из одинаковых по массе молекул (однородный газ); пусть m_0 — масса молекулы;

2) молекулы газа — хаотически движущиеся, не взаимодействующие между собой материальные точки; будем, следовательно, считать, что размеры молекул пренебрежимо малы по сравнению с расстоянием между ними;

3) движение каждой молекулы подчиняется законам механики Ньютона, а удары молекул о стенку абсолютно упругие (происходят без потери кинетической энергии).

Важно обратить внимание учащихся на то, что пока мы не можем сказать, истинны или ложны наши предположения (гипотезы). Если результаты теории будут соответствовать данным опыта о свойствах газа, значит, можно считать предположения в основном верными. Если мы получим результаты, которые будут противоречить опыту, нам придется принимать другие гипотезы.

Мы предположили, что молекулы газа движутся хаотично, а состояние газа равновесное. Это означает, что все направления движения молекул равновероятны, т. е. по любому из произвольно выбранных направлений движется одинаковое число молекул. Опытным подтверждением справедливости этого предположения может служить тот факт, что свободно падающий мыльный пузырь имеет форму шара: если бы направления движения молекул были неравновероятны, мыльный пузырь не был бы шарообразным. Условие равновесности газа означает, что распределение молекул по объему сосуда равномерное: концентрация молекул газа одинакова для всех частей сосуда (части сосуда могут быть много меньше самого сосуда, но они должны быть макроскопическими).

Сказанное позволяет ввести упрощенную модель молекулярного хаоса. Будем считать, что молекулы движутся только по трем направлениям — вдоль осей x, y и z декартовой системы координат. Тогда число молекул, движущихся, например, по оси x, равно $^1/_3\ N$, если N — число молекул в газе. В положительном направлении оси x движется $^1/_6\ N$ молекул, столько же молекул движется в противоположном направлении.

Следующий шаг в рассуждениях касается вопроса о скоростях молекул. Естественно предположить, что молекулы движутся с различными скоростями. Значения скоростей молекул газа нам неизвестны. Считая то или иное значение скорости молекулы случайным и учитывая, что число молекул газа в сосуде велико (порядка 10^{19}), можно для расчетов воспользоваться средней скоростью $\bar{v}$, равной средней квадратической скорости (средняя арифметическая скорость молекул газа, поскольку газ как целое покоится, равна нулю).

Давление газа на стенки сосуда мы считаем обусловленным ударами молекул. Модель явления поясняем с помощью опыта (рис. 3.2). Поскольку скорости движения молекул мы усреднили, постольку и силу ударов о стенку сосуда будем считать усредненной: будем считать, что каждая молекула при ударе о стенку действует на нее с одинаковой силой, равной средней.

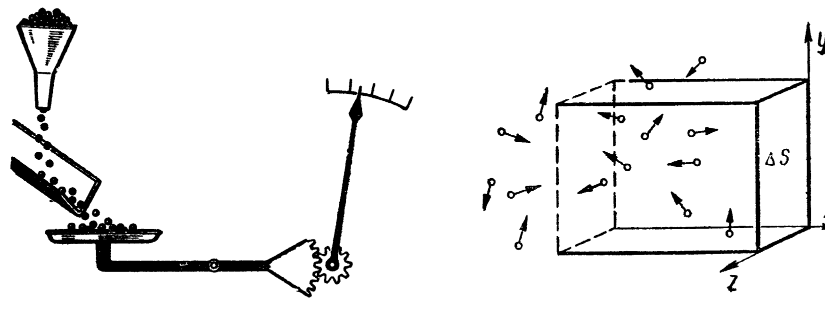


Рис. 3.2 Рис. 3.3

Приведенные выше рассуждения еще не являются выводом уравнения. Они лишь конкретизируют модель молекулярной системы, с которой мы собираемся «работать». В то же время они служат иллюстрацией статистического метода описания молекулярной системы — задание модели системы, предположения о распределении вероятностей, усреднение свойств по ансамблю.

Приступаем к выводу уравнения. Вычислим модуль силы $\vec{F}$, с которой молекулы газа действуют на плоскую поверхность (стенку) площадью ΔS, перпендикулярную, например, оси x (рис. 3.3). Тогда давление p найдем, разделив модуль силы $\vec{F}$ на площадь ΔS.

Согласно предположению, молекулы движутся по законам Ньютона. Из механики VIII класса учащиеся знают, что сила, действующая на тело, измеряется изменением импульса за единицу времени:

$$\vec{F} = \frac{\Delta (m_0\vec{v})}{\Delta t}.$$

Чтобы найти силу $\vec{F}$, с которой молекулы газа действуют на стенку, надо, следовательно, найти изменение импульса стенки за время $\Delta t = 1$ с.

Так как удары молекулы о стенку упруги, а масса стенки бесконечно велика по сравнению с массой молекулы, то после упругого соударения со стенкой скорость молекулы, движущейся перпендикулярно стенке, будет по модулю равна скорости до удара, но противоположна по направлению. Поэтому изменение проекции импульса молекулы на ось x в результате соударения со стенкой равно

$$m_0\bar{v} - (-m_0\bar{v}) = 2m_0\bar{v}.$$

Модуль изменения импульса стенки в соответствии с законом сохранения импульса равен модулю изменения импульса молекулы. Иначе говоря, при столкновении молекулы со стенкой стенке передается импульс, модуль которого равен $2m_0\bar{v}$.

За время $\Delta t = 1$ с о стенку ударятся молекулы, находящиеся в прямом цилиндре с основанием ΔS и высотой $\bar{v}$ ($\bar{v}$ — средняя скорость молекул) и движущиеся к стенке. Очевидно, что число молекул в этом цилиндре равно $n \Delta S \bar{v}$, где n — концентрация молекул, $\Delta S \bar{v}$ — объем цилиндра. Из них к стенке движется $\frac{1}{6} n \Delta S \bar{v}$ молекул. Каждая молекула сообщает площадке импульс, модуль которого равен $2m_0\bar{v}$. Импульс, передаваемый стенке за время $\Delta t = 1$ с (изменение импульса стенки за 1 с), равен (по модулю)

$$\frac{1}{6} n\Delta S v \cdot 2m_0\bar{v}$$

и равен, как отмечалось, модулю силы $\vec{F}$, действующей на площадку.

Таким образом,

$$|\vec{F}| = \frac{1}{3} n m_0 \bar{v}^2 \Delta S.$$

Давление, следовательно, равно

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \bar{v}^2.$$

Выводы, получаемые на основе принятых предположений, в основном подтверждаются опытом. Значит, принимаемые нами упрощения оправданы. Разумеется, это не означает, что истинные свойства системы молекул соответствуют свойствам модели. В действительности молекулы сталкиваются друг с другом. Можно подсчитать, что при условиях, близких к нормальным, каждая молекула соударяется с другими миллиарды раз в секунду. Молекулы газа движутся без взаимных соударений только в условиях, называемых вакуумом, — в условиях, когда средняя длина свободного пробега молекул не меньше размеров сосуда, содержащего газ.

3. ТЕМПЕРАТУРА С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ТЕОРИИ

Согласно исходным предположениям молекулярной теории мы рассматриваем газ как механическую систему материальных точек. Поскольку для механики чуждо понятие температуры, мы не можем вычислить температуру газа только на основе гипотез этой теории. Более того, если бы понятие температуры не было введено до изучения молекулярно-кинетической теории, у нас не возникла бы задача выразить этот параметр через микроскопические параметры. С точки зрения самой молекулярно-кинетической теории нет необходимости во введении температуры как свойства

молекулярной системы именно потому, что мы рассматриваем молекулярную систему как механическую.

Обращаем внимание учащихся на то, что температура — параметр термодинамический, но что теперь ему может быть дано молекулярно-кинетическое толкование: он может быть выражен через микроскопические параметры. При этом мы по необходимости будем опираться на понятия термодинамики.

В термодинамике принимают, что два тела имеют одинаковую температуру, если при соприкосновении этих тел не будет передачи теплоты от одного тела к другому. С точки зрения молекулярных представлений названное условие термодинамики будет выполнено, если средняя кинетическая энергия $\bar{E}_1$ движения молекул одного тела будет равна средней кинетической энергии $\bar{E}_2$ движения молекул другого тела. Тем самым температура с точки зрения представлений о молекулах и их движении соотносится с энергией поступательного движения молекул.

После рассмотренных общих замечаний ставим задачу о нахождении связи между температурой и средней энергией движения молекул. Используя основное уравнение теории, приведенное к виду

$$p = \frac{2}{3} n \frac{m_0\overline{v^2}}{2},$$

и термодинамическое уравнение состояния газа $pV = RT$, полученное из опытных газовых законов, а также наше предположение о том, что температуру следует соотнести с энергией поступательного движения молекул, находим уравнение

$$\frac{m_0\overline{v^2}}{2} = \frac{3}{2}\frac{R}{N_A}T = \frac{3}{2}kT.$$

Важно иметь в виду, что мы принимаем это уравнение как требуемое для установления связи температуры с микроскопическими параметрами. Это уравнение мы не выводим из основания теории, мы написали его, опираясь на понятия термодинамики (по-видимому, по этой причине принимаемое уравнение нередко называют полуэмпирическим). Правомерность такой интерпретации температуры как параметра системы должна быть проверена на опыте: следствия теории, если мы на верном пути, должны подтверждаться опытом.

4. ОПЫТНАЯ ПРОВЕРКА СЛЕДСТВИЙ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ГАЗА

С помощью уравнения, выражающего зависимость температуры как макроскопического параметра системы от параметров молекул, и ранее выведенного основного уравнения теории получаем формулу для давления газа в виде $p = nkT$. Справедливость

этого уравнения нуждается в проверке. Показываем, что из формулы $p = nkT$ как очевидные следствия вытекают газовые законы Бойля — Мариотта, Гей-Люссака, Шарля, Авогадро, Дальтона. Тем самым мы получаем доказательство справедливости (правомерности) принятой нами интерпретации как давления газа, так и температуры.

Из уравнения $p = nkT$ непосредственно следует, что давление p пропорционально температуре, если n постоянно (если масса и объем газа постоянны). Это закон Шарля. Умножив обе части уравнения на объем V и учтя, что произведение $nV = N$ — число молекул в газе, получаем: $pV = NkT$; это, очевидно, есть закон Бойля — Мариотта: если $N = \text{const}$, $T = \text{const}$, то $pV = \text{const}$. Из последнего уравнения при условиях $p = \text{const}$ и $N = \text{const}$ получается закон Гей-Люссака: пропорциональная зависимость объема от температуры.

Показываем, что если в объеме V содержится смесь газов, то $n = n_1 + n_2 + n_3 + \ldots$, где n_1, n_2, n_3, ... — концентрации молекул соответственно первого, второго и третьего газов. Поэтому общее давление смеси равно

$$p = nkT = (n_1 + n_2 + n_3 + \ldots)\, kT = p_1 + p_2 + p_3 + \ldots .$$

Это закон Дальтона.

Записываем уравнение в виде $p = \frac{N}{V}kT$ и показываем, что при одинаковых давлении p и температуре T в равных объемах различных газов содержится одинаковое число N молекул. Действительно, если $p_1 = \frac{N_1}{V_1}kT_1$—давление первого газа, $p_2 = \frac{N_2}{V_2}kT_2$—давление второго газа, то при $p_1 = p_2$, $V_1 = V_2$, $T_1 = T_2$ имеем: $N_1 = N_2$.

Совпадение выводов теории и данных опыта свидетельствует о том, что наши предположения, касающиеся строения газа и свойств газовых молекул, близки к истине.

Как важный вывод теории учащиеся должны воспринять формулу $\bar{v} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$, с помощью которой они обнаруживают, что скорость движения молекул газа сравнима со скоростью движения пули. Это новое знание, даваемое теорией. Оно удивляет и настораживает. Встает вопрос: неужели на самом деле так? Этот вывод теории вынуждает нас обратиться к опыту, который дал бы ответ на вопрос: так ли это?

Опыты Лошмидта по диффузии газов как будто бы не подтверждали вывод теории: Лошмидт нашел, что скорость диффузии одного газа в другой на два порядка меньше скорости, предсказываемой формулой теории. На этом факте следует задержать внимание учащихся: в свое время он многими физиками воспринимался как опровержение «гипотетической физики» — теории, строящейся на основе гипотез.

В общем плане знакомим учащихся с тем, как удалось снять это противоречие теории и опыта, к каким новым знаниям оно привело теорию: на основе уточнения модели молекулы (твердый шарик вместо материальной точки) Р. Клаузиус объяснил отличие скорости диффузии газа от средней скорости молекул и вывел формулу для подсчета среднего числа соударений молекул и средней длины свободного пробега (в среднем каждая молекула испытывает $\sim 10^9$ столкновений в 1 с, проходя от столкновения до столкновения около 10^{-6} см). Тем самым теоретически было получено знание, не вытекающее непосредственно ни из какого опыта. Кроме того, теория подсказала путь для экспериментального измерения скорости движения молекул — метод потока молекул в вакууме (метод молекулярных пучков). С помощью этого метода О. Штерн осуществил опыты, подтвердившие предсказание теории. На этом примере, как и на ряде других, убедительно выявляется эвристическая роль физической теории.

Рассматриваем опыт Штерна по определению скорости молекул, демонстрируем модель опыта [57, ч. 1, опыт 73], затем кинокольцовку «Опыт Штерна». Сообщаем, что за разработку молекулярно-лучевого метода и открытие магнитного момента протона О. Штерну в 1943 г. была присуждена Нобелевская премия.

Одно из следствий теории газа — формула для внутренней энергии. Показываем, что для разреженного газа внутренняя энергия находится как сумма кинетических энергий N молекул. Следовательно,

$$U = \frac{m_0\overline{v^2}}{2} N = \frac{3}{2} kTN = \frac{3}{2} RT.$$

Таким образом, внутренняя энергия разреженного газа не зависит от объема, что соответствует результату опыта Джоуля.

ГЛАВА 4
ЗАКОНЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

Термодинамика как научная теория оформилась в XIX в., при этом основополагающими были работы С. Карно, Р. Клаузиуса, Дж. Джоуля, В. Томсона. За общность подхода при анализе явлений, широкую область применения, простоту и изящество методов исследования уже тогда термодинамика получила гордое название королевы наук, которое вполне характеризует ее значение и положение в современном естествознании.

Термодинамика как теория основывается на двух началах (принципах), из которых она, привлекая ряд опытных данных, с помощью логики и математики получает свои выводы. Поскольку начала (принципы) термодинамики, будучи обобщениями опыта, представляют собой неопровержимые истины, выводы термодинамики оказываются столь же неопровержимыми, как и ее принципы.

По действующей программе IX класса основам термодинамики посвящены темы «Тепловые явления. Газовые законы» и «Первый

закон термодинамики». Однако содержание второй темы шире ее названия. Эта тема призвана ознакомить учащихся с основными закономерностями теплового движения, с физическими основами теплоэнергетики как ведущего звена современной энергетики (закономерностями преобразования теплового движения в механическое), способствовать формированию научного мышления и диалектико-материалистического мировоззрения.

Согласно программе в теме «Первый закон термодинамики» излагаются такие основные понятия, как «теплота», «работа», «внутренняя энергия», «первое начало термодинамики», «основы работы тепловых двигателей». Объяснительная записка рекомендует отметить качественное отличие теплового движения от механического — его необратимость.

Все эти вопросы курса физики имеют большое образовательное и мировоззренческое значение. Очевидна их роль с точки зрения принципа политехнического образования. Сознательное усвоение учащимися этих вопросов можно считать необходимым условием решения задач общего образования.

Принятая в настоящем пособии методика изучения вопросов термодинамики в IX классе исходит из того, что метод преподавания раздела должен соответствовать методологии науки. Из двух методов, используемых термодинамикой, наиболее общим является метод термодинамических потенциалов, разработанный Гиббсом. Однако из-за вычислительных трудностей он не получил достаточно широкого распространения в преподавании. Большой наглядностью и общностью обладает метод Карно — Клаузиуса, или метод круговых процессов (циклов).

Метод круговых процессов, как показывает опыт, может быть приспособлен для целей преподавания термодинамики в средней школе. С его помощью легко выясняется смысл как основных понятий («работа», «теплота», «внутренняя энергия»), так и следствий, вытекающих из принципов термодинамики (условия работы тепловых машин, невозможность вечных двигателей первого и второго рода, недостижимость стопроцентного КПД периодически действующей тепловой машины и др.).

Дополнительный материал, привлекаемый с целью более строгого в научном отношении изложения основ термодинамики, учитель, разумеется, вправе рассматривать как неосновной и не излагать учащимся.

Примерное планирование темы может быть следующим:

1-й урок. Работа и теплообмен как способы изменения состояния системы.
2-й урок. Первое начало термодинамики.
3-й урок. Внутренняя энергия.
4-й урок. Решение задач.
5-й и 6-й
уроки. Условия работы тепловых двигателей.

7-й урок. Абсолютная температура. Формула Карно для КПД теплового двигателя.

8-й урок. Технические применения термодинамики.

1. РАБОТА И ТЕПЛООБМЕН КАК СПОСОБЫ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ

Изучение темы начинаем с исторической справки: отмечаем тесную связь исследований в области термодинамики с внедрением в производство тепловых (паровых) машин. Термодинамика как область знания порождена теплотехникой, создание теории тепловых машин в XIX в. стало потребностью практики. Сообщаем, что само слово «термодинамика» образовано от греческих слов thermos — теплый и dynamikos — силовой, относящийся к силе. Кратко рассказываем о работе С. Карно (1796—1832) «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу» (1824 г.). В этой работе ставилась задача дать теоретическое объяснение возможности получения механического движения из тепла, в частности ответить на вопрос: ограниченна или бесконечна движущая сила тепла? Затем переходим к введению понятий, без которых нельзя решить эту задачу.

С понятиями работы и количества теплоты учащиеся знакомы по курсу физики VII класса. В IX классе даем определения этих понятий как количественных мер взаимодействия системы с внешними телами.

Учащиеся должны понять, что оба понятия — «работа», как процесс взаимодействия системы с внешними телами, сопровождающийся изменением внешних параметров системы (объема, например), и «теплообмен», как взаимодействие, не сопровождающееся изменением внешних параметров системы, — являются понятиями термодинамики. С точки зрения термодинамики работа и теплообмен — две единственно возможные формы передачи энергии. К ним термодинамика сводит все многообразие взаимодействий.

При введении количественных мер взаимодействия термодинамической системы с внешними телами следует обратить внимание на то, что знак работы A и количества теплоты Q природой не задан (не определен). Выбор знака предоставляется исследователю. Общепринято следующее правило знаков для количества теплоты и работы: теплота Q считается положительной, если она передается системе; работа A считается положительной, если работу совершает система (когда объем системы увеличивается).

Опыты по демонстрации взаимодействия системы с внешними телами (изменение состояния в результате теплообмена и в результате совершения работы) разнообразны. Например, воздух в ручном насосе можно нагреть за счет совершения работы (быстро перемещая поршень) и за счет передачи теплоты (приблизив насос на некоторое время к пламени горелки).

Далее знакомим учащихся с графическим вычислением работы. Начинаем с простейшего случая — определения работы расширения газа при постоянном давлении. Получаем формулу работы $A = p \Delta V$ и строим соответствующий график. Затем показываем способ вычисления работы для произвольного процесса: замена процесса суммой n элементарных изобарных процессов с давлением p_i ($i = 1, 2, 3, \ldots, n$) таких, чтобы в пределах расширения на объем ΔV_i давление p_i можно было считать постоянным (изменяющимся пренебрежимо мало). Отмечаем, что работа расширения от объема V_1 до объема V_2 численно равна площади фигуры, ограниченной графиком процесса, отрезком V_1V_2 на оси абсцисс и ординатами, соответствующими объемам V_1 и V_2 (рис. 4.1).

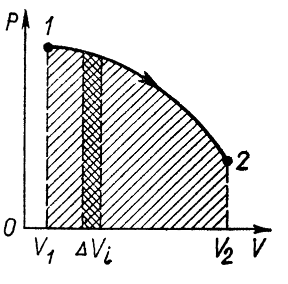


Рис. 4.1

2. ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ

Группа вопросов программы, относящихся к первому началу термодинамики, по своему идейному содержанию, мировоззренческой и политехнической значимости обладает несомненными воспитательными и образовательными возможностями и заслуживает пристального внимания со стороны учителя.

Первое начало представляет собой одно из самых широких научных обобщений и не должно быть воспринято учащимися как однопорядковое, например с опытными законами для газов. Открытие этого начала было революционным шагом в развитии науки. Ф. Энгельс относил это открытие к числу крупнейших достижений естествознания XIX в., ставил его в один ряд с открытием клетки и созданием эволюционной теории Дарвина.

Первое начало излагаем учащимся как обобщение данных опыта. Целесообразно начать со следующей аналогии, предложенной в свое время Ж. Перреном.

Наблюдения показывают, что предмет, упавший на землю, сам собой не поднимается. Чтобы его поднять, необходимы изменения во внешней обстановке. Можно, например, поднять данный предмет за счет опускания какого-либо груза. Так, за счет опускания груза массой 100 кг на 10 м можно поднять груз массой 1000 кг на 1 м. Никакой механизм не даст возможности за счет опускания на 10 м груза массой 100 кг поднять, например, на 1 м не 1000 кг, а 1200 кг. Если бы такое было возможно, это означало бы, что 200 кг груза были бы подняты «даром». Механический принцип сохранения энергии утверждает, что увеличение энергии поднимаемого тела всегда эквивалентно уменьшению энергии опускаемого тела.

Явление, подобное рассмотренному, было замечено при нагревании тела трением за счет механической энергии: убыль ме-

ханической энергии тела, совершающего работу в процессе трения, эквивалентна количеству теплоты, полученному телом, нагреваемым в процессе трения. Так был установлен первый принцип термодинамики — принцип эквивалентности теплоты и работы.

Обращаем внимание учащихся на то, что первый принцип термодинамики сформулирован на основе большого числа измерений (от грубых до прецизионных) соотношения между количеством теплоты, получаемым за счет работы, и значением работы. Опыты Джоуля в установлении этого соотношения были решающими, но не единственными. Упоминаем при этом работы Румфорда, Майера [38, т. I; 43, с. 229].

Рассматриваем опыт Джоуля, описанный в учебном пособии [2, с. 60—61]. В опыте термодинамическая система состоит из калориметра, жидкости (ртуть или вода) и вертикальной мешалки. Над системой совершалась работа A, равная убыли энергии падающих грузов. Система переходила из одного состояния в другое — нагревалась. Охлаждаясь, система возвращалась в исходное состояние (отдавала при этом внешним телам количество теплоты Q). Отмечаем, что многочисленные повторения опыта, осуществленные с разными жидкостями и с высокой степенью точности, позволили сделать вывод: *если система совершает круговой процесс и получает от внешних тел энергию в процессе работы, а отдает энергию в процессе теплообмена, то всегда количество теплоты Q, отдаваемое системой, пропорционально количеству работы.*

Опытами проверено и обратное превращение — превращение теплоты Q в работу A. Убыль одной величины всегда эквивалентна полученной второй величине. Если работа A и теплота Q измерены в разных единицах, они пропорциональны. Если их измерить в одинаковых единицах, то всегда соблюдается условие $A = Q$.

Важно подчеркнуть, что эквивалентность теплоты Q и работы A соблюдается только для круговых процессов, когда система возвращается в первоначальное состояние, и для стационарных процессов, когда состояние системы в процессе взаимодействия с внешними телами не изменяется.

Многочисленные опытные данные по измерению соотношения между теплотой Q и работой A были обобщены и возведены в принцип науки — принцип эквивалентности теплоты и работы. Р. Клаузиус предложил называть этот принцип *первым принципом термодинамики.*

3. ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ. СВОЙСТВА РАБОТЫ И КОЛИЧЕСТВА ТЕПЛОТЫ

Прежде чем вводить понятие внутренней энергии на основе принципа эквивалентности теплоты и работы, напоминаем учащимся основные свойства механической энергии на примере энергии тела в потенциальном поле. Рассмотрим с помощью рисунка на доске мысленный опыт, описанный в книге Э. Роджерса [15].

Пусть, например, груз от двери A сарая переносится в дальний угол B его чердака (рис. 4.2). Как бы мы ни перемещали его — сначала подняли вверх, а потом переместили по горизонтали, сначала по горизонтали, а потом вверх, или вверх по наклонной плоскости, или по какой-то причудливой кривой, или даже сначала подняли над крышей, а затем опустили на чердак, — прирост потенциальной энергии будет тем же самым. Чтобы показать, как это следует из закона сохранения энергии, рассмотрим перемещение груза из A в B по двум путям, причем будем начинать и кончать состоянием покоя, трением пренебрегаем. Перенесем груз из A в B по пути 1, а затем назад по пути 2. Возвратившись в начальную точку A, мы пришли к той же потенциальной энергии. Следовательно, затраты энергии на путях 1 и 2 одинаковы. В противном случае мы могли бы создать вечный двигатель, перемещая груз вверх по одному пути, а вниз — по другому и получая при каждом цикле прирост энергии.

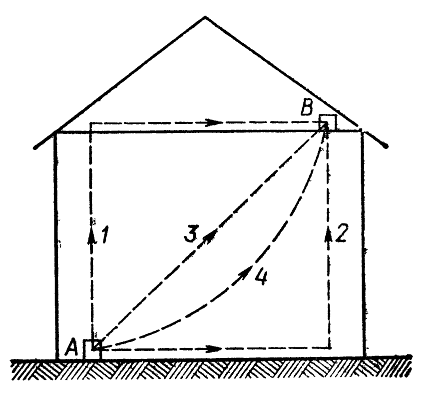


Рис. 4.2

Рассмотренный опыт показывает, что изменение энергии тела при перемещении в потенциальном поле не зависит от пути, по которому тело переходит из одного состояния в другое, и равно работе A, т. е. $\Delta E = A$. Кроме того, если тело совершает цикл (круговой процесс), то изменение энергии тела равно нулю.

Аналогично этому в соответствии с первым принципом термодинамики (эквивалентностью теплоты и работы) легко заключить[1], что при переходе системы из состояния A в состояние B величина $Q - A$ не зависит от пути, а для кругового процесса суммарное значение этой величины равно нулю. Это значит, что $Q - A$ есть изменение некоторой функции состояния U, т. е. $Q - A = \Delta U$. Таким образом мы получаем общепринятую запись уравнения пер-

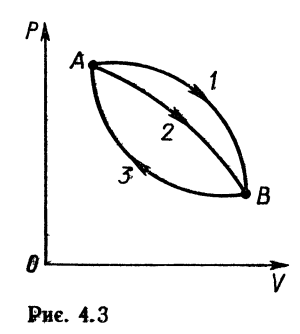


Рис. 4.3

[1] Доказательство состоит в следующем. Переведем систему из состояния A в состояние B по двум путям — по пути 1 и по пути 2 — и заставим ее вернуться в исходное состояние по пути 3 (рис. 4.3). На основании принципа эквивалентности напишем равенство количества теплоты $Q_1 + Q_3$ и суммарной работы $A_1 + A_3$ для первого кругового процесса и равенство $Q_2 + Q_3 = A_2 + A_3$ для второго кругового процесса системы. Вычтя из одного равенства другое, найдем, что $Q_1 - A_1 = Q_2 - A_2$. Это означает, что величина $Q - A$ не зависит от пути и является изменением некоторой функции состояния U, т. е. $Q - A = \Delta U$.

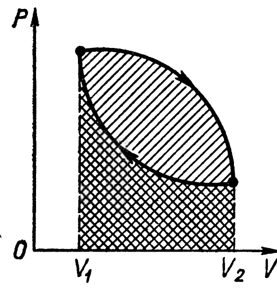


Рис. 4.4

вого начала термодинамики. Функция состояния U была названа *внутренней энергией*. Даем соответствующую формулировку первого начала, записанного в форме $Q = \Delta U + A$.

Если система совершает круговой процесс, то изменение внутренней энергии равно нулю. Тогда имеем $Q = A$. Это равенство указывает на то, что работа A и теплота Q имеют одинаковые свойства. Поэтому достаточно выяснить свойства одной из этих величин, например работы A.

Переведем систему из одного состояния в другое двумя разными путями (двумя процессами). Графически изобразим работу в том и другом процессе (рис. 4.4). Убеждаемся, что работы неодинаковы, что работа A, и следовательно количество теплоты Q, зависит от пути перехода системы из одного состояния в другое (от процесса). Поэтому теплота Q и работа A не функции состояния. Количество теплоты, являясь мерой переданной энергии от одного тела другому, не содержится в этих телах. Точно так же работа A не содержится в системе. Внутренняя же энергия, напротив, содержится в системе.

4. ПРИМЕНЕНИЕ ПЕРВОГО НАЧАЛА ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ

Мы определяли простейший процесс как процесс, в котором один из параметров остается неизменным. Сообщаем, что дать термодинамическое описание процесса — это значит вычислить как меру взаимодействия системы с внешними телами (работу A, количество теплоты Q), так и изменение параметров системы (давление, объем, температуру, внутреннюю энергию).

Описание изобарного и изохорного процессов не вызывает у учащихся затруднений. Усилия следует сосредоточить на анализе изотермического и адиабатного процессов.

При анализе изотермического процесса мы опираемся на опытный факт независимости энергии разреженного газа от объема. Следовательно, при изотермическом расширении работа системы A равна количеству теплоты Q, полученному от внешних тел.

Известные затруднения при анализе изотермического расширения газа представляет вывод формулы работы в этом процессе: в IX классе мы не можем найти работу путем интегрирования выражения $dA = pdV$. Поэтому приходится ограничиться графической иллюстрацией метода вычисления.

В связи с изучением первого начала определяем адиабатный процесс как процесс, протекающий без теплообмена с внешней средой, демонстрируем охлаждение газа при адиабатном расширении и нагревание при адиабатном сжатии (воздушное огниво).

5. ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ. НЕВОЗМОЖНОСТЬ ВЕЧНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПЕРВОГО РОДА

Материал о тепловых машинах и их КПД труден для учащихся. Многие ученики связывают недостижимость для периодически действующей машины КПД, равного единице, с неизбежностью потерь энергии на трение, излучение, т. е. с факторами, непринципиальными с точки зрения теории тепловых машин. Необходимость охладителя как одного из условий теплового двигателя остается, как правило, неосознанной учащимися, допускается мысль, что двигатель может работать и без охладителя, что охладитель лишь способствует увеличению КПД двигателя. Учащиеся еще в VII классе успешно усваивают кинематику различных тепловых двигателей, но общие физические условия работы тепловых двигателей сформулировать обычно не могут.

Урок, посвященный изучению основ работы тепловых машин, целесообразно начать с общей оценки роли этих машин в народном хозяйстве — промышленной энергетике, транспорте (наземном, водном, воздушном), сельском хозяйстве, а также в военном деле.

С точки зрения термодинамики тепловым двигателем является термодинамическая система, которая взаимодействует с внешними телами и совершает механическую работу. Системой, совершающей работу (двигателем), может быть и газ в цилиндре с подвижным поршнем, и жидкость, и твердое тело.

Напоминаем, что термодинамическая система может совершить работу, не получая энергию от внешних тел — в процессе адиабатного расширения. В этом случае работа совершается за счет внутренней энергии. Так совершается работа, например, при стрельбе из духового или огнестрельного оружия, при взрыве химической или атомной бомбы. Во всех этих случаях количество теплоты, получаемое системой от внешних тел, равно нулю, а работа, которую может совершить система, ограничена, поскольку внутренняя энергия системы не бесконечна.

Для производственных нужд и транспорта практическое значение имеют двигатели, в которых система совершает тот или иной круговой процесс и, получая от внешних тел количество теплоты, совершает работу за счет этой теплоты. Круговой процесс системы в принципе может быть повторен сколько угодно большое число раз, и такая система может работать практически сколь угодно долго. Такие двигатели называют периодически действующими (циклическими) машинами. На основании первого начала термодинамики мы можем утверждать, что система, совершающая круговой процесс, может выполнить работу A за счет количества теплоты Q, получаемого ею от внешних тел (изменение внутренней энергии за цикл равно нулю, поэтому $A = Q$). Первый принцип термодинамики исключает такой процесс, с помощью которого можно было бы совершить работу «даром», так, чтобы при этом не уменьшалась энергия системы или других тел.

Сообщаем, что воображаемый двигатель, который совершал бы работу «даром» и, следовательно, работал бы вопреки первому началу термодинамики, называют вечным двигателем первого рода. Первое начало термодинамики равноценно утверждению, что *вечный двигатель первого рода невозможен.*

6. УСЛОВИЯ РАБОТЫ ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

С помощью анализа общеизвестных явлений следует показать, что одного первого начала термодинамики недостаточно для понимания наблюдаемых в природе процессов. Для этой цели весьма подходящим является вопрос относительно направления течения рек. Используя уравнение первого начала термодинамики, показываем, что работа A по подъему воды с низкого уровня (например, с уровня Каспийского моря) на более высокий уровень (уровень, например, озера Селигер) может быть совершена либо за счет теплоты Q, либо за счет внутренней энергии самой воды. Первое начало, таким образом, не запрещает рекам течь вспять. Точно так же не исключает оно ряд других явлений (самопроизвольный подъем тела, нагревание горячих тел за счет охлаждения холодных), которые, однако, не наблюдаются. Р. Клаузиус предложил в качестве принципа науки принять положение о невозможности самопроизвольного перехода теплоты от менее нагретых тел к телам более нагретым.

Второе начало в формулировке Клаузиуса, как показало экспериментальное обучение, не вызывает у учащихся затруднений. Оно согласуется с их собственными наблюдениями и на первый взгляд не содержит ничего нового. Однако «настоящий смысл положения Клаузиуса заключается в том, что тепло вообще никаким способом, с помощью какого бы то ни было процесса, не может быть перенесено с более холодного тела на более теплое без того, чтобы не осталось других изменений»[1].

На основе второго начала термодинамики в формулировке Клаузиуса доказываются два важнейших утверждения, касающиеся особенностей работы тепловой машины. Одно утверждение гласит, что для работы периодически действующего теплового двигателя необходимы по крайней мере два различно нагретых тела — нагреватель и холодильник. Это утверждение мы получаем с помощью косвенного доказательства. Предполагаем, что возможен такой цикл, в котором система взаимодействует только с одним нагревателем и совершает отличную от нуля работу. Тогда, употребив эту работу для нагревания трением тела с температурой выше, чем температура нагревателя, получим самопроизвольный переход теплоты от тела менее нагретого к телу более нагретому,— это будет единственным результатом цикла. Однако такой результат противоречит второму принципу термодинамики.

Таким же образом доказываем второе утверждение, гласящее, что количество теплоты Q, полученное системой от нагревателя, в результате кругового процесса не может быть нацело преобразовано в работу, часть теплоты должна быть передана менее нагретому телу — холодильнику.

Доказательство обоих указанных утверждений приводит нас к формулировке второго начала, данной В. Томсоном: *невозможно построить периодически действующую машину, вся деятельность которой сводится к поднятию тяжести и охлаждению теплового резервуара.*

---

[1] Планк М. Термодинамика. Пер. с нем. Л.— М., 1925, с. 93.

Невозможность стопроцентного преобразования теплоты в работу с помощью циклически действующей тепловой машины означает, что КПД такой машины

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$$

не может быть равен единице.

Даем схему преобразования энергии в тепловом двигателе (рис. 4.5).

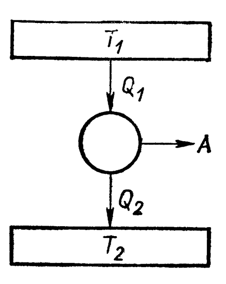


Рис. 4.5

Затем рассматриваем вопрос о воображаемой машине, вся деятельность которой сводилась бы к совершению работы за счет охлаждения какого-то теплового резервуара. Такая машина не была бы вечным двигателем — машина работала бы за счет теплоты, получаемой от нагревателя. Однако практически такая машина могла бы заменить вечный двигатель: если бы можно было создать монотермический двигатель, работающий за счет, например, теплоты, отбираемой из вод океанов, то мы могли бы, преобразуя в работу теплоту, заимствованную у воды океанов, приводить в движение машины всех заводов, существующих во всем мире, и только более чем через тысячу лет заметили бы, что температура воды в океане понизилась на сотую долю градуса. Именно поэтому такой двигатель был назван вечным двигателем второго рода, в отличие от вечного двигателя первого рода. Второе начало термодинамики гласит, что *вечный двигатель второго рода невозможен*.

Изучение второго начала термодинамики позволяет выполнить рекомендацию программы — осветить вопрос о необратимости тепловых явлений. В связи с введением второго начала термодинамики мы говорили о том, что наблюдаемые в природе процессы сами собой идут в одном определенном направлении. Однако эти процессы, идущие обычно в одном направлении, по существу, должны быть разделены на две группы — на обратимые и необратимые.

Обратимыми оказываются все механические и электрические явления, обычно протекающие в одном направлении.

Типичным примером *необратимого* процесса является теплообмен между двумя телами при конечной разности температур: передать теплоту от холодного тела к теплому можно с помощью двух последовательных преобразований — сначала надо преобразовать теплоту в работу, затем — работу в теплоту. Однако преобразование теплоты в работу невозможно без компенсации (вечный двигатель второго рода невозможен).

Затем анализируем процессы расширения газа в вакуум, диффузию, процессы, сопровождающиеся трением; делаем вывод, что необратим любой процесс, если он сопровождается: а) трением; б) передачей теплоты при конечной разности температур; в) расширением без совершения работы.

После этого знакомим учащихся с формулой для КПД идеальной тепловой машины — формулой Карно $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$, которая показывает пути увеличения КПД любой тепловой машины. При этом сообщаем, что С. Карно доказал две важные теоремы:

1) КПД идеальной тепловой машины не зависит от свойств рабочего тела и от конструкции двигателя, он определяется исключительно разностью температур нагревателя и холодильника;

2) термический КПД любой тепловой машины, работающей в заданном интервале температур, не может быть больше КПД идеальной тепловой машины, работающей в том же интервале температур.

Из технических приложений термодинамики следует осветить действие паровой (турбинной) установки и четырехтактного двигателя внутреннего сгорания. В обзорной лекции может быть освещено устройство холодильника, теплового насоса и способы преобразования теплового движения в электрическое. Необходимый материал имеется в книгах [15] и [76].

ГЛАВА 5
СВОЙСТВА ПАРОВ

В соответствии с действующей программой по физике для средней школы свойства паров изучаются в теме «Взаимные превращения жидкостей и газов. Свойства паров».

В задачу темы входит углубление понятий «испарение» и «кипение», изучение зависимости температуры кипения от давления, формирование у учащихся новых для них понятий: «критическая температура», «критическое состояние вещества», «насыщающие пары», «ненасыщающие пары», «влажность воздуха», «точка росы» — и выяснение зависимости давления насыщающего пара от температуры.

Изучение указанного круга вопросов имеет важное познавательное и практическое значение. Понятия «насыщающие пары», «ненасыщающие пары», зависимость давления насыщающего пара и его плотности от температуры широко используются в современной теплотехнике; на основе знания этой зависимости производится расчет паровых котлов на тепловых электростанциях. Эти зависимости, а также явление понижения температуры жидкости при ее испарении в совокупности с явлением понижения температуры газа (пара) при его адиабатном расширении лежат в основе современных способов получения низких температур и сжижения газов.

Изучение взаимосвязи явлений испарения и конденсации, зависимости температуры кипения от давления и давления насыщающего пара от температуры, формирование понятий «критическая температура», «критическое состояние», «точка росы» играют

важную роль в воспитании диалектического метода мышления учащихся, в раскрытии всеобщей закономерности перехода постепенных количественных изменений в изменения коренные, качественные.

В процессе изучения темы учащиеся знакомятся с приборами для измерения относительной влажности (гигрометром и психрометром), с методами ее измерения и влиянием относительной влажности на жизнедеятельность человека, животных и сельскохозяйственных растений. Важное практическое значение имеет ознакомление учащихся со способами изменения влажности, которые применяются в производственных помещениях, в сельском хозяйстве, а также в повседневной жизни.

Материал темы (5 ч) может быть распределен по урокам следующим образом:

1-й урок. Испарение жидкостей. Удельная теплота парообразования.

2-й урок. Равновесие между жидкостью и паром. Кипение. Зависимость температуры кипения от давления.

3-й урок. Зависимость давления и плотности насыщенного пара от температуры. Критическая температура.

4-й урок. Влажность воздуха. Абсолютная и относительная влажность воздуха. Гигрометры. Психрометр.

5-й урок. Решение задач.

1. ИСПАРЕНИЕ. УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОТА ПАРООБРАЗОВАНИЯ. КИПЕНИЕ

При изучении испарения внимание должно быть сосредоточено на выяснении «механизма» испарения и его объяснении на основе молекулярно-кинетической теории; на понижении температуры жидкости при испарении и объяснении этого явления. Полезно повторить опыты, показывающие зависимость испарения от рода жидкости, величины свободной поверхности и быстроты удаления образовавшихся паров с поверхности жидкости. Следует обратить внимание на единство двух процессов — испарения и конденсации.

Явление кипения, как и явление испарения, для учащихся не является новым. Первоначальные сведения о нем они получили в курсе природоведения IV класса и затем в курсе физики VII класса. В VII классе они познакомились с условиями, при которых может происходить кипение, получили понятие о температуре кипения. Новой для девятиклассников является зависимость температуры кипения от давления. В учебном пособии все эти вопросы рассмотрены довольно полно. Поэтому целесообразно предложить учащимся вспомнить сущность явлений и затем углубить свои знания на основе самостоятельной работы с учебником [2]. Перед чтением параграфа перед учащимися можно поставить вопрос: «Что нового содержится в данном параграфе о кипении по сравнению с тем, что вы знали о нем из курса физики

VII класса?» Можно предложить подготовить рассказ о прочитанном, пользуясь планом обобщенного характера о явлении.

Желательно само явление еще раз продемонстрировать учащимся. Для обеспечения хорошей видимости процесса кипения целесообразно опыт показывать в проходящем свете. В этом случае явление будет восприниматься более осмысленно. Если рядом с сосудом установить микрофон, подключенный к усилителю низкой частоты, то всему классу будет слышен характерный шум при кипении. Внимание учащихся должно быть обращено на выяснение «механизма» явления.

При проверке усвоения прочитанного нужно уточнить, что кипение начинается при температуре, при которой давление насыщенного пара в пузырьках воздуха становится равным внешнему давлению.

Важно также проверить, как учащиеся усвоили определение явления: «Кипение жидкости представляет собой процесс парообразования, происходящий не только с поверхности жидкости, но и внутри пузырьков воздуха по всему объему жидкости».

Можно с этой целью привести варианты определения, встречающиеся в работах учащихся, предложив им выбрать из них наиболее полное и правильное:

1. Кипением называется парообразование при температуре кипения.
2. Кипением называется испарение, происходящее при условии, когда к жидкости подводится теплота.
3. Кипением называется парообразование, происходящее не только с поверхности жидкости, но и внутри пузырьков воздуха по всему объему жидкости.
4. Кипением называется парообразование, происходящее по всему объему жидкости.

Учащиеся часто путают понятия «кипение», «парообразование» и «испарение». Предупреждению этой путаницы способствует использование следующей схемы:

Парообразование ↗	Испарение	— парообразование с поверхности жидкости
Парообразование ↘	Кипение	— парообразование по всему объему жидкости

Схема помогает учащимся лучше понять и запомнить, что парообразование является родовым понятием по отношению к испарению и кипению.

Полезно также с целью уточнения различий между испарением и кипением предложить учащимся заполнить таблицу (табл. 5.1).

Новым по сравнению с тем, что изучалось в VII классе, является более подробное рассмотрение вопроса о зависимости температуры кипения от давления. В VII классе этот факт рассматривался на основе опытных данных, констатировался сам по себе. В IX классе выясняется причина такой зависимости. Отмечают, что повышение температуры кипения при увеличении внешнего давления приводит к уменьшению того количества теплоты, которое необходимо сообщить жидкости, чтобы превратить ее в пар.

Таблица 5.1

Явление	Внешние признаки явления	Условия, при которых оно протекает	Определение
Испарение	1) Уменьшение объема жидкости с течением времени; 2) высыхание влажных предметов	1) Наличие свободной поверхности жидкости; 2) удаление паров с поверхности жидкости; 3) при любой температуре, соответствующей жидкому состоянию вещества	Испарение — процесс парообразования со свободной поверхности жидкости
Кипение	1) Возникновение пузырьков внутри жидкости, поднимающихся вверх, увеличивающихся при этом в объеме и лопающихся на поверхности жидкости; 2) интенсивное испарение с поверхности жидкости	1) Нагревание до определенной для каждой жидкости температуры; 2) равенство давления пара внутри пузырьков воздуха давлению воздуха над поверхностью жидкости; 3) непрерывный подогрев жидкости	Кипение — процесс парообразования, происходящий с поверхности жидкости и внутри пузырьков воздуха, расположенных по всему объему жидкости

2. ИЗОТЕРМА РЕАЛЬНОГО ГАЗА

Напомнив, что вещество может находиться в твердом, жидком и газообразном состояниях, учитель выдвигает проблему: выяснить условия, при которых возможно превращение газа в жидкость и обратно. Для решения этой проблемы необходимо внимательно проследить за изменением давления и объема реального газа при различных температурах. Далее рассматривают мысленный опыт по сжатию реального газа (пара), предполагая, что газ сжимается изотермически.

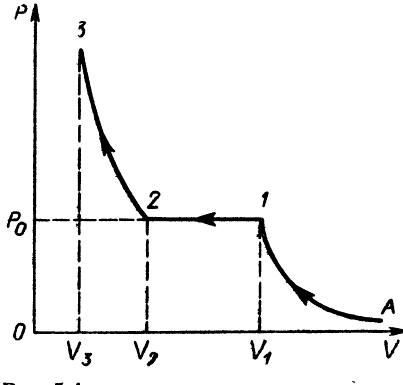


Рис. 5.1

Вначале при большом объеме и малом давлении пар подчиняется закону Бойля — Мариотта (изменение давления обратно пропорционально объему) (рис. 5.1, участок графика *А*, *1*). При дальнейшем сжатии,

начиная с некоторого значения V_1, объем уменьшается, а давление остается неизменным (участок графика *1*, *2*). Пар при этом начинает конденсироваться, в цилиндре появляются капельки жидкости. При дальнейшем уменьшении объема весь пар превращается в жидкость (участок графика *2*, *3*).

Постоянное давление p_0, при котором жидкость находится в динамическом равновесии со своим газом, называют *давлением насыщенного пара*, а сам пар при этом называют *насыщающим паром*.

Причину независимости (постоянства) давления насыщающего пара от объема можно предложить учащимся выяснить самостоятельно на основе работы с учебным пособием [2].

3. ЗАВИСИМОСТЬ ДАВЛЕНИЯ И ПЛОТНОСТИ НАСЫЩАЮЩЕГО ПАРА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ. КРИТИЧЕСКАЯ ТЕМПЕРАТУРА

При изучении данного вопроса внимание учащихся обращают на то, что давление пара при более высоких температурах увеличивается быстрее, чем при низких (рис. 5.2), и быстрее, чем давление идеального газа. Причиной является следующее обстоятельство. Давление пара увеличивается за счет двух факторов: а) за счет того, что часть жидкости переходит в пар, в результате чего плотность пара растет, возрастает и давление; б) за счет повышения температуры (увеличения скорости движения молекул).

Когда вся жидкость испарится, пар перестанет быть насыщенным и его давление будет зависеть от температуры (рис. 5.3) так же, как давление идеального газа.

Здесь уместно уточнить понятия «пар» и «газ». *Парами* называют такие газообразные тела (например, пары воды, ртути, эфира, аммиака, бензина и т. д.), которые при обычных атмосферных условиях могут существовать одновременно с жидкостью, из которой они образовались, и относительно легко переходить в жидкое состояние. *Газами* называют такие стойкие газообразные тела (например, водород, кислород, азот и др.), для превращения которых в жидкое состояние необходимо применение очень низких температур и высоких давлений.

Далее рассматривают зависимость плотности насыщающего пара и плотности жидкости от температуры. Эта зависимость выражается графически (рис. 5.4). Из графика видно, что при увеличении температуры плотность жидкости все более приближается к плотности пара. При некоторой температуре, называемой критической, плотности жидкости и насыщенного пара становятся одинаковыми (выравниваются), так что различить жидкость и пар оказывается уже невозможным. Этот момент на графике (рис. 5.4) фиксируется точкой *К* (критическое состояние).

Критическое состояние характеризуется для каждого вещества вполне определенными значениями критической температуры, объема и давления пара (газа).

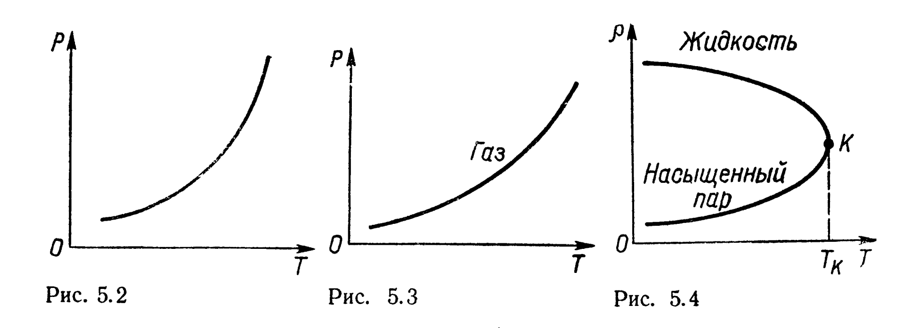


Рис. 5.2 Рис. 5.3 Рис. 5.4

Наблюдать критическое состояние удобно с помощью прибора Авенариуса, который наполнен эфиром ($T_к$ = 194 К).

4. ВЛАЖНОСТЬ ВОЗДУХА. ГИГРОМЕТРЫ. ПСИХРОМЕТР

Вопрос о влажности воздуха достаточно полно изложен в учебном пособии [2]. Однако желательно его дополнить сведениями о влиянии относительной влажности на состояние человека, животных и растений. Надо отметить, что как низкая относительная влажность, так и высокая оказывают отрицательное влияние на жизнедеятельность человека и других организмов. Конкретный материал о влиянии относительной влажности на растения и животных учитель найдет в методической литературе [78]. При изучении гигрометров и психрометра необходимо предусмотреть выполнение учащимися практических работ по определению относительной влажности. В завершение изучения темы следует организовать решение задач на определение абсолютной и относительной влажности, точки росы и др.

Для внеклассного чтения по теме учащимся можно порекомендовать статью Асламазова Л. Г. «Свойства паров, испарение и кипение жидкостей» (Квант, 1974, № 1).

ГЛАВА 6
СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ

Жидкости — это вещества в конденсированном агрегатном состоянии, промежуточном между твердым и газообразным. Современная теория жидкостей придерживается взглядов о непрерывности перехода газового и жидкого состояний. При этом жидкости сохраняют отдельные черты как твердых тел, так и газов. В связи с этим при изучении темы «Свойства жидкостей» важно раскрыть учащимся сходство и различие в строении и свойствах жидкостей по сравнению с твердыми телами и газами.

Специфические особенности жидкого состояния обусловлены существенным взаимодействием частиц при хаотичности их теплового движения. Даже современная физическая теория испытывает затруднения в учете этих особенностей при попытке создать простую молекулярную модель жидкости. Поэтому в средней школе общие свойства жидкостей изучаются лишь на качественном уровне. Вместе с тем поверхностные явления на границе соприкосновения жидкой, твердой и газообразной сред (поверхностное натяжение, смачивание, капиллярность, адгезия, трение и др.) имеют исключительно важное значение в различных областях науки и практики. Учитывая это, изучению поверхностных явлений на границе жидкости отведено основное место в данной книге.

Примерное поурочное планирование темы может быть следующим:

1-й урок. Общие свойства жидкостей. Поверхностное натяжение.

2-й урок. Энергия поверхностного слоя. Сила поверхностного натяжения.

3-й урок. Лабораторная работа «Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкостей».

4-й урок. Явления смачивания и капиллярности.

5-й урок. Практическое применение явлений капиллярности и смачивания. Решение задач.

1. ОБЩИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ. ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ

Главными особенностями жидкости являются ее способность *сохранять объем* (в отличие от газов объем жидкости не определяется объемом сосуда) и существование *свободной поверхности* на границе с газом или паром.

Усвоить это учащиеся могут при объяснении ряда фактов. Так, сохранение объема жидкостью обусловлено малой ее сжимаемостью. Например, при давлении $7 \cdot 10^8$ Па ртуть сжимается всего на 3%, глицерин — на 7% (в объеме). Используя справочные данные, учащиеся легко придут к выводу, что плотность жидкостей примерно в 1000 раз превышает плотность их паров при одних и тех же условиях. Например, плотность воды при 100 °С и атмосферном давлении в 1800 раз больше плотности водяного пара. Жидкости сопротивляются и увеличению объема. Это свойство жидкости используется, например, в сифоне. Диффузия в жидкостях протекает значительно медленнее, чем в газах. На сходство свойств жидкости и твердого тела указывает то, что удельный объем при отвердевании изменяется гораздо меньше, чем при испарении; удельная теплота плавления намного меньше удельной теплоты испарения; теплоемкость при отвердевании изменяется гораздо меньше, чем при переходе жидкости в пар; для жидкости характерен близкий порядок в расположении молекул.

Перечисленные свойства жидкости объясняются тем, что молекулы (атомы) в жидкости расположены на расстояниях, близких к их диаметру (10^{-10} м).

Используя график зависимости сил взаимодействия между молекулами от расстояния, объясняем учащимся, что при таких расстояниях взаимодействие между молекулами настолько значительно, что порядок значения средней кинетической энергии их движения E_k и потенциальной энергии E_p определяется соотношением $E_k \sim E_p$ (для газов $E_k \gg F_p$, для твердых тел $E_k \ll F_p$). В соответствии с этим соотношением молекула некоторое время удерживается в положении равновесия, но благодаря тепловому движению или внешним воздействиям она скачком перемещается в новое положение равновесия. Время пребывания молекулы в положении равновесия порядка $10^{-11} - 10^{-12}$ с (время «оседлой жизни»). В зависимости от природы жидкости и температуры время «оседлой жизни» может изменяться [11].

Непрерывный, хаотичный характер перемещений молекул обусловливает одно из основных свойств жидкости — *текучесть*, которая выражается в преимущественном направлении перемещений молекул в жидкости под влиянием внешней силы. Благодаря текучести жидкость, например, принимает форму сосуда, в котором находится. Но при изменении формы объем жидкости не изменяется.

Следует подчеркнуть, что если время действия внешней силы меньше времени «оседлой жизни» молекул в жидкости, то механизм текучести, описанный выше, проявиться не успевает. В этом случае действию внешней силы препятствуют упругие молекулярные силы, что приводит к проявлению упругих свойств жидкости. Например, если резко ударить палкой по воде (еще лучше — по более вязкой, чем вода, жидкости), то палка может сломаться. При объяснении результата опыта подчеркиваем, что для жидкости одновременно присущи, казалось бы, взаимно исключающие свойства текучести и упругости. Более того, жидкости обнаруживают и прочностные свойства, что характерно для твердых тел.

При рассмотрении свойств поверхностного слоя жидкости вначале демонстрируем явления поверхностного натяжения [57, ч. I, опыт 84]. Известно много опытов, иллюстрирующих это явление [52]. Главное внимание здесь необходимо уделить фактам самопроизвольного сокращения поверхности жидкости и различию свойств жидкости в поверхностном слое (примерно в несколько молекулярных диаметров толщиной) и внутри ее. Далее объясняем результаты опытов. Часто при объяснении ссылаются на нескомпенсированность сил притяжения между молекулами поверхностного слоя. Такой подход требует разъяснений, что́ следует понимать под нескомпенсированностью молекулярных сил в условиях равновесия между ними. Сложным для понимания школьников является и структура поверхностного слоя жидкости.

Доступным объяснением явления будет, на наш взгляд, следующее. Число «соседей» для молекулы, находящейся внутри жид-

кости, больше, чем их число для молекулы поверхностного слоя. Средние расстояния между молекулами поверхностного слоя несколько больше, чем расстояния между молекулами внутри жидкости. Значит, потенциальная энергия молекул внутри жидкости (для них справедливо соотношение $E_k \sim E_p$) будет меньше, чем для того же количества молекул поверхностного слоя (для них $E_k > E_p$). Наличие избыточной энергии (поверхностной энергии) и объясняет явление поверхностного натяжения. Если поверхностный слой обладает поверхностной энергией $W_п$, а площадь поверхности S, то на единицу площади приходится поверхностная энергия $\sigma = \frac{W_п}{S}$. Величина σ получила название *коэффициента поверхностного натяжения* жидкости. Но почему σ называют коэффициентом поверхностного натяжения? При ответе на этот вопрос[1] используем принцип минимума потенциальной энергии [67].

Опыт показывает, что всякая система стремится перейти в состояние с минимальной энергией. Для жидкости это сводится к тому, что при отсутствии внешних сил она принимает такую форму, что при заданном объеме ее поверхность минимальна. Этим объясняется, что в опыте Плато [57, ч. 1, опыт 91] и в состоянии невесомости капля жидкости принимает сферическую форму.

Стремление жидкости уменьшить свою поверхность приводит к тому, что на границе жидкости возникает сила поверхностного натяжения, направленная вдоль поверхности. Для нахождения ее значения демонстрируем опыт с мыльной пленкой на прямоугольной рамке, имеющей подвижную сторону [57, ч. 1, опыт 85]. Опыт показывает, что пленка стремится сократиться. Допустим, что внешние силы совершают работу A, увеличивая площадь пленки на ΔS, тогда $\sigma = \frac{A}{\Delta S}$, если условия совершения работы изотермические. При этих условиях кинетическая энергия молекул неизменна. Следовательно, при увеличении поверхности жидкости совершается работа A, связанная с увеличением потенциальной энергии поверхностного слоя или поверхностной энергии (т. е. $\Delta U = A$), поскольку потенциальная энергия молекул внутри жидкости остается неизменной (жидкость сохраняет объем). Но $A = |\vec{F}| \Delta l$, где $\vec{F}$ — сила поверхностного натяжения, Δl — изменение длины границы поверхностного слоя. Если $\Delta S = l \Delta l$, тогда $\sigma = \frac{|\vec{F}|}{l}$, где l — длина границы поверхностного слоя. Таким образом, пленка всегда находится в состоянии натяжения, а коэффициент поверхностного натяжения характеризует значение силы поверхностного натяжения, отнесенной к единице длины границы поверхности жидкости. Подчеркиваем, что σ получает

[1] В работе [67] предложен вариант энергетического объяснения явления поверхностного натяжения с учетом термодинамических представлений.

силовую и энергетическую трактовку. Работа по увеличению поверхности жидкости (в изотермических условиях) на единицу площади при сохранении объема жидкости и есть коэффициент поверхностного натяжения (энергетическая трактовка).

Обращаем внимание на различие между растяжением резиновой пленки и поверхностным натяжением жидкости при увеличении ее площади поверхности. При растяжении резиновой пленки увеличивается расстояние между молекулами, составляющими ее поверхность. При увеличении поверхности жидкости работа A определяется перемещением молекул из внутренних слоев жидкости в поверхностный слой, а объем жидкости сохраняется (или изменяется незначительно). Демонстрируем увеличение поверхности жидкости на опыте и измеряем силу поверхностного натяжения [57, ч. 1, опыт 85]. Далее учащиеся определяют коэффициент поверхностного натяжения жидкости при выполнении лабораторной работы.

Отмечаем, что при повышении температуры поверхностное натяжение всех веществ уменьшается. Это связано с тем, что плотность насыщенного пара при повышении температуры возрастает, а плотность жидкости уменьшается. В результате поверхностная энергия жидкости убывает, что приводит к уменьшению поверхностного натяжения. Изменение поверхностной энергии можно вызвать и изменением химического состава поверхностного слоя. Так, уменьшение поверхностной энергии жидкости можно достичь за счет добавления в поверхностный слой молекул других веществ (поверхностно-активных) [57, ч. 1, опыт 86].

Влияние примесей на изменение поверхностной энергии можно продемонстрировать на следующих опытах:

В стеклянный цилиндрический сосуд наливают воду. Сосуд располагают на столике на фоне белого экрана. Действуя карандашом на поверхностный слой жидкости, показывают, что пленка, незначительно прогнувшись под действием карандаша, прорывается и карандаш погружается в жидкость. Вынув карандаш из воды, на поверхность ее насыпают порошок ликоподия, после чего вновь осторожно действуют карандашом на жидкость. Теперь пленка прогибается на глубину 5—7 см, не прорываясь. После прекращения действия карандашом пленка восстанавливает первоначальную форму, при которой ее свободная поверхность минимальна.

В кювету (или в чашечку Петри) с плоским прозрачным дном наливают небольшой слой жидкости (высотой 1—2 см). На поверхность воды помещают вырезанную из картона фигурку (например, реактивной лодки или рыбки). Капнув в сопло лодки (или в хвост рыбки) капельку мыльного раствора или бросив кусочек камфоры, наблюдают движение фигурки. Явление объясняется тем, что мыло или камфора уменьшает поверхностное натяжение воды в том месте, куда эти вещества попали в воду. Поэтому фигурка движется в сторону, где поверхностное натяжение жидкости больше. Опыт демонстрируется в теневой проекции или выполняется

учащимися фронтально. Этот опыт учащиеся могут воспроизвести и дома.

Полезно провести также опыт с различными веществами, влияющими на поверхностное натяжение жидкости (молоко, растительное масло, глицерин, машинное масло, бензин и др.), с целью изучения их влияния на это явление.

Для закрепления полученных знаний предлагаем упражнения типа [29, № 598—602; 27, № 573—575]. На уроке можно использовать набор диапозитивов «Поверхностный слой жидкости», диафильм «Свойства жидкости».

2. ЯВЛЕНИЯ СМАЧИВАНИЯ И КАПИЛЛЯРНОСТИ

Поверхностная энергия жидкости зависит не только от свойств самой жидкости и ее температуры, но и от среды, с которой жидкость граничит. Когда жидкость граничит с другой жидкостью или твердым телом, плотности веществ сравнимы между собой и пренебречь взаимодействием частиц жидкости с частицами соприкасающихся сред уже нельзя. На примере смачивания и капиллярности учащихся знакомят с зависимостью поверхностной энергии жидкости от свойств соприкасающихся сред.

Каждая из трех соприкасающихся сред характеризуется своим значением σ. Их соотношение, в частности, определяет условие равновесия капли жидкости на поверхности твердого тела, ее растекание (смачивание). Если суммарная поверхностная энергия системы «твердое тело — жидкость — воздух» меньше, чем поверхностная энергия системы «твердое тело — воздух», то жидкость смачивает твердое тело, т. е. растекается по его поверхности. В противном случае наблюдается несмачивание. Для уяснения качественной картины явления смачивания рассматриваем изменение поверхности границы жидкости с помощью рисунка [67, рис. 44, 45]. Наблюдаем на опыте явления смачивания и несмачивания и образование краевых углов [57, ч. 1, опыт 87]. Делаем вывод, что мерой смачивания является угол Θ между границей системы «жидкость —твердое тело» и «жидкость — пар». Для простоты разбираем только случаи полного смачивания ($\Theta = 0$) и несмачивания ($\Theta = 180°$) на примере капиллярного явления[1]. После демонстрации явления капиллярности [57, ч. 1, опыт 89] предлагаем учащимся решить задачу:

На какую высоту *h* поднимается смачивающая жидкость, плотность которой ρ, коэффициент поверхностного натяжения σ, в капилляре радиусом *r*?

Решение. Поскольку сила тяжести, действующая на столбик жидкости, уравновешивает силу поверхностного натяжения $\vec{F}$ ($|\vec{F}| = 2\pi r\sigma$), получаем соотношение $2\pi\, r\, \sigma = \rho\, Vg$, где V — объем

[1] В работе [67, § 27] подробно дана методика преподавания этих вопросов, которая может быть использована учителями частично или полностью.

столбика жидкости ($V = \pi r^2 h$, h — высота столбика), g — ускорение свободного падения. Таким образом, $h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$.

Используя эту формулу, учащиеся определяют самостоятельно коэффициент поверхностного натяжения жидкости (например, воды) (диаметр капилляра известен). В качестве домашнего задания можно предложить учащимся оценить диаметр капилляров промокательной бумаги.

Для закрепления знаний решаем задачи типа [29, № 799—820]. На уроке желательно показать кинофильм «Капиллярные явления в природе и технике» и диафильм «Свойства жидкости».

При рассмотрении практического применения явлений смачивания и капиллярности обращаем внимание на значение поверхностных явлений в различных областях науки и жизни[1]. Яркими примерами могут служить движение растворов по капиллярам в почве и растениях [61], адсорбция газов углем [57, ч. I, опыт 92], образование коллоидных растворов, получение стекла, цемента, гипса, явления флотации [57, ч. 1, опыт 88], коррозии, действие моющих средств и др. Поверхностные явления определяют также прочностные свойства материалов [57, ч. 1, опыт 86].

ГЛАВА 7
СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Изучению свойств твердых тел в школьном курсе физики придается важное значение. Наличие твердых материалов, удовлетворяющих разнообразным требованиям, существенным образом определяет прогресс науки и техники. Ведущая роль в научном обосновании технологии производства и обработки материалов принадлежит, среди других наук, физике твердого тела.

Для ознакомления школьников с основами физики твердого тела необходимо дать им современные представления о строении и свойствах этих тел, а также о путях получения материалов с требуемыми свойствами. Этот учебный материал имеет важное политехническое, профориентирующее значение. Рассмотрим основные методические особенности изучения темы «Свойства твердых тел».

Приступая к изучению темы, учащиеся уже имеют элементарные представления об упругих и пластических свойствах, о типах химической связи, механизме их образования и характере взаимодействия между частицами твердых тел, о классификации кристаллов в соответствии с типом химической связи, о строении и некоторых свойствах этих тел. Эти знания учащихся необходимо использовать при изучении данной темы, обобщить и развить дальше. Программа позволяет использовать при изучении темы молекулярно-кинетические и термодинамические представления, что повышает

---

[1] См.: Советская энциклопедия, т. 4, с. 59.

научный уровень изучения этих вопросов. Так как применение большинства твердых материалов определяется в первую очередь их механическими и тепловыми свойствами, то в теме основное внимание уделяется этим свойствам.

На основе указанных представлений могут быть объяснены, хотя и упрощенно, общие и отличительные свойства кристаллических и аморфных тел, их строение (структура), механические свойства и тепловое расширение этих тел и способы управления свойствами материалов. В основе этих знаний лежат представления физики твердого тела о плотной упаковке, о кристаллической решетке, об устойчивом состоянии частиц в твердых телах, об упорядоченной структуре кристаллов и их симметрии, об анизотропии и изотропии твердых тел, о реальном строении этих тел, о главных механических свойствах материалов и о зависимости различных свойств твердых тел от их реального строения и др. Эти вопросы и составляют основное содержание темы.

Для наглядности изучения строения и свойств, а также механизма процессов, протекающих в твердых телах, современная наука широко использует мысленные модели[1] идеального и реального кристаллов, механизмов упругой и пластической деформации; материальные модели пространственной решетки, плотной упаковки.

При изучении специфических особенностей твердого состояния вещества, как одного из его агрегатных состояний, учащиеся узнают, что твердые тела отличаются от других, во-первых, стабильностью формы (при нормальных или близких к ним условиях), во-вторых, характером теплового движения частиц (атомов, ионов, молекул), совершающих малые хаотические колебания около положений равновесия. Свойства твердых тел, в отличие от газов и жидкостей, определяются симметрией и наличием дефектов структуры. Разрушение упорядоченной структуры кристаллических тел при их плавлении представляет собой скачкообразное, качественное изменение основных свойств этих тел — вещество переходит в жидкое состояние. Качественные изменения в свойствах этих тел происходят и при переходе от упругой к пластической деформации. Если упругая деформация относится к обратимым процессам, то пластическая — к необратимым. Но есть глубокое различие в необратимости пластической деформации и необратимости разрушения тела при испытании его на прочность. Разъяснение сущности и специфики изучаемых свойств и процессов, протекающих в твердых телах, на основе молекулярно-кинетических и термодинамических представлений имеет глубокое мировоззренческое значение.

Существуют различные варианты расположения учебного материала темы. Можно вначале изложить механические свойства

---

[1] О мысленных моделях, используемых при изучении молекулярной физики, см.: Усанов В. В. Физические модели при изучении молекулярной физики в IX классе. — Физика в школе, 1974, № 5, с. 27.

твердых тел, затем объяснить их на основе изучения строения этих тел [67]. Другой вариант: вначале углубить знания учащихся о строении тел, опираясь на ранее приобретенные, затем рассмотреть и объяснить свойства тел и пути управления ими. Мы придерживались последнего варианта, поскольку расположение учебного материала в этом случае соответствует его расположению в предыдущих темах.

Примерное поурочное планирование темы может быть следующим:

1-й урок. Строение и свойства твердых тел. Кристаллические и аморфные тела.
2-й урок. Плотная упаковка частиц в кристаллах. Анизотропия.
3-й урок. Виды деформаций твердых тел. Механическое напряжение. Упругость. Закон Гука.
4-й урок. Пластичность. Прочность. Пределы упругости, прочности, текучести. Запас прочности. Диаграмма растяжения.
5-й урок. Тепловое расширение твердых тел.
6-й урок. Создание материалов с требуемыми свойствами. Применение материалов в технике и быту.
7-й урок. Обобщение материала темы. Решение задач.

1. КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ И АМОРФНЫЕ ТЕЛА

Понимание природы свойств твердых тел возможно только на основе представлений квантовой механики, а с ними учащиеся знакомятся лишь в конце курса. Поэтому целесообразно дать классические представления физики твердого тела. Но об их ограниченности следует учащимся сказать.

По характеру расположения частиц (или их структуре) твердые тела могут находиться в кристаллическом или аморфном состояниях. Кристаллы отличаются пространственной периодичностью всех свойств. В аморфном состоянии дальний порядок отсутствует и частицы колеблются около хаотически расположенных центров равновесия. Согласно принципу минимума потенциальной энергии, наиболее устойчивое состояние равновесия частиц твердого тела соответствует кристаллической структуре. Поэтому аморфное состояние не является равновесным и с течением времени происходит кристаллизация аморфных тел, например кристаллизация стекла. Однако в обычных условиях время перехода в равновесное состояние может быть столь велико, что аморфное тело практически неограниченное время ведет себя как устойчивое твердое тело. Эти представления физики твердого тела могут быть сформированы на основе следующих знаний.

В начале изучения темы рассматриваем общие свойства твердых тел — они сохраняют форму и объем при отсутствии внешних воздействий и обладают прочностью, в отличие от жидкостей и газов. Объясняем эти свойства твердых тел, опираясь на моле-

кулярно-кинетические и энергетические представления. При отвердевании жидкостей между частицами устанавливаются такие же связи, как и между атомами в молекулах (материал курса химии VIII класса). Потенциальная энергия E_p частиц, составляющих твердое тело, значительно превосходит среднюю кинетическую энергию их движения $\overline{E}$: $E_p \gg \overline{E}$, тогда как для газов $\overline{E} \gg E_p$, а для жидкостей $E_p \sim \overline{E}$. Кроме того, частицы в твердом теле совершают колебания относительно положения устойчивого равновесия.

Демонстрируем двумерную модель твердого тела. На дне сосуда из оргстекла, поставленного на прибор для получения теневой проекции, сделаны небольшие углубления так, что помещенные в них шарики или горошины располагаются на близких расстояниях друг от друга упорядоченным образом. При слабом потряхивании сосуда шарики сохраняют устойчивое равновесие. Опираясь на понятие потенциальной энергии, объясняем, что частицы твердого тела занимают положения устойчивого равновесия, в которых обладают минимумом потенциальной энергии [67, с. 75].

Обращаем внимание учащихся на то, что при отвердевании жидкости в одних случаях может образоваться кристалл, в котором частицы, благодаря взаимодействию, располагаются упорядоченно и тесно друг к другу. Потенциальная энергия частиц в этом случае минимальна и $E_p \sim \overline{E}$. Другими словами, *кристалл — устойчивое, упорядоченное образование частиц в твердом состоянии вещества*. В других случаях отвердевание жидкости может привести к образованию аморфных тел, в которых расположение частиц примерно такое же, какое было в жидкости, т. е. преимущественно хаотичное. Для аморфных тел $E_p \gg \overline{E}$ и при сравнительно небольших изменениях температуры или других физических воздействиях эти тела «текут». *Главное* различие аморфных и кристаллических тел состоит в их структуре и проявляется наиболее ярко в изотропии аморфных и анизотропии кристаллических тел.

Чтобы учащиеся осознали это различие, знакомим их с зависимостью свойств твердых тел от упорядоченности их структуры путем выполнения простых экспериментальных заданий. Например, предлагаем испытать на разрыв гофрированную и тетрадную бумагу, расколоть легкими ударами молотка крупные кристаллы поваренной соли, расщепить ножом бруски дерева с ярко выраженной волокнистой структурой, расщепить на отдельные листочки кристаллы слюды, разрезать пластилин и т. п. Учащиеся легко устанавливают, что прочность одних тел (гофрированной бумаги, дерева, поваренной соли, слюды и др.) зависит, а других (тетрадной бумаги, пластилина) не зависит от выбора направления их испытания на прочность. Предлагаем рассмотреть структуру тел, доступную для изучения с помощью лупы (бумаги, стекла, дерева, слюды и др.), и сделать вывод о существовании зависимости прочности тел от упорядоченности их структуры.

Среди других различий аморфных и кристаллических тел указываем на *определенность* температуры плавления кристаллических тел и *правильность* формы монокристаллов.

Кратко останавливаемся на истории кристаллографии. Ученые давно предположили, что правильная форма кристалла обусловлена тесным, упорядоченным расположением частиц кристалла или его плотной упаковкой [5, с. 19].

Демонстрируем модель плотной упаковки кристалла следующим образом. На вогнутое (например, часовое) стеклышко, поставленное на прибор для получения теневой проекции, кладем два шарика. Учащиеся видят, что система шариков обладает минимальной энергией в том случае, когда шарики соприкасаются. Добавляем еще один шарик, и возникает система трех шариков (система трех взаимодействующих пар). Для семи шариков минимум энергии достигается при гексагональном расположении. При этом взаимодействуют 12 пар — максимально возможное количество для данной системы. Добавление других шариков приводит к повторению исходной гексагональной группы.

С помощью шариков (например, из пластилина) учащиеся могут самостоятельно убедиться в образовании правильных многоугольников при плотной упаковке шариков. Но шарики можно плотно упаковать различным образом. Значит, в зависимости от типа плотной упаковки строение кристалла может быть различным. Демонстрируем модели некоторых типов плотных упаковок и соответствующие им кристаллические решетки (рис. 7.1). Рассказываем, что кристаллическая решетка есть модель структуры кристалла. По расположению узлов этой решетки судят о типе плотной упаковки частиц кристалла, о его строении. Полезно предложить учащимся зарисовать кристаллические решетки демонстрируемых типов плотных упаковок частиц кристаллов. Тип упаковки частиц в кристалле зависит также и от размеров частиц, и от природы сил связи между ними [57, ч. 1, опыт 94]. Кратко останавливаемся на явлении полиморфизма на примере кристаллов алмаза и графита [69, с. 119].

Кристаллографией установлено, что правильность внешнего вида кристаллов обусловлена определенным упорядоченным расположением их частиц: отдельные части кристаллической решетки периодически повторяются при пространственном ее рассмотрении. Это важнейшее свойство получило название «симметрия кристалла» [5, с. 13].

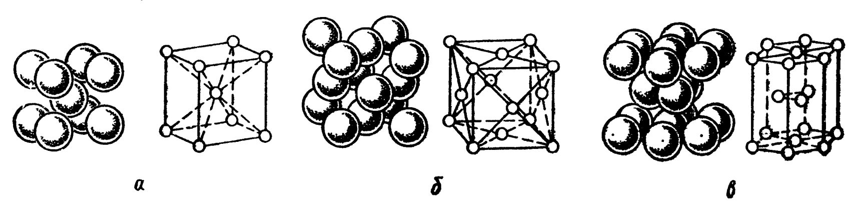


Рис. 7.1

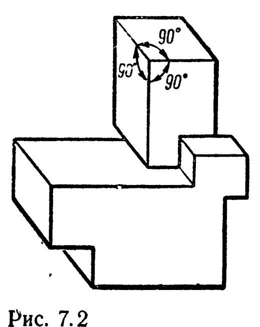


Рис. 7.2

Благодаря симметрии у кристаллов каждого вида вещества углы между гранями не только *постоянны*, но и имеют *определенное* значение (рис. 7.2). Измерив эти углы у одного кристалла, мы твердо знаем, что у всех кристаллов этого вида вещества углы между гранями те же, хотя внешне кристаллы могут отличаться размерами и формой. Этот метод определения вида кристаллического вещества разработан основоположником науки о кристаллах Е. С. Федоровым [69, с. 106].

Хотя монокристаллы большого размера в природе встречаются редко, они все чаще используются в технике. Например, удается изготовить лопатку турбины, имеющую монокристаллическую структуру. Выращивают монокристаллы искусственно различными методами [5, § 6]. В качестве домашнего задания можно предложить учащимся вырастить кристаллы квасцов, медного купороса, сахара и др. из их насыщенного раствора [17, задание 1].

Большинство твердых тел — это поликристаллы, которые широко применяются как конструкционные материалы. Демонстрируем поликристаллическую структуру, состоящую из множества сросшихся кристаллов, показывая излом крупнозернистых поликристаллов цинка, висмута, стали и др.

Неодинаковость свойств кристаллов по различным направлениям есть проявление их *анизотропии*. На уроке следует показать анизотропию прочности, присущую всем кристаллам, отметив, что у разных веществ наблюдается анизотропия различных свойств. О ней можно лишь кратко рассказать и проиллюстрировать на ряде примеров [57, ч. 1, опыт 95].

Рассматриваем структуру аморфного и кристаллического тела на примере двумерной модели. В кристаллическом теле вдоль различных направлений встречается неодинаковое количество атомов (рис. 7.3, *а*), а в аморфном — одинаковое (рис. 7.3, *б*) [69, с. 111]. Таким образом, упорядоченность структуры кристаллических тел является причиной их анизотропии [57, ч. 1, опыт 96]. Структура аморфных тел хаотична, поэтому они изотропны. Анизотропией обладают дерево, гофрированная бумага и другие тела, имеющие упорядоченную структуру. Поликристаллы в основном изотропны, поскольку образую-

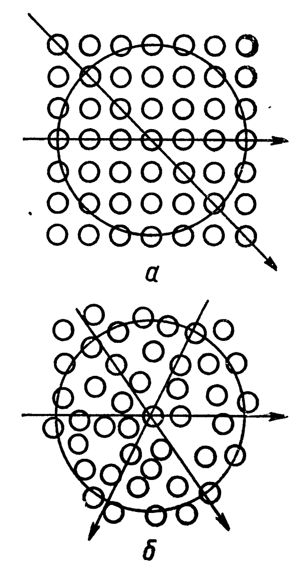


Рис. 7.3

щие их кристаллы срослись беспорядочно. Только в случае преимущественной ориентации кристаллов, образующих поликристалл (например, текстурированный поликристалл), он анизотропен.

В качестве одного из заданий можно предложить учащимся самостоятельно объяснить образование осколков в форме прямоугольного параллелепипеда при раскалывании кристаллов поваренной соли, расщепление слюды на пластинки и т. п. Предлагаем объяснить результат следующего опыта. Если поставить на пластинку слюды острие иглы и слегка ударить по игле, на слюде возникнут трещинки в форме шестилучевой звездочки с углами 60° между лучами. При объяснении следует использовать модели кристаллических решеток этих веществ.

Различие кристаллического и аморфного состояний можно проиллюстрировать на следующем факте. Леденец покрывается кристаллами сахара, стекло мутнеет от образования в нем кристаллов и др.

При изучении указанного выше учебного материала можно воспользоваться диафильмом «Кристаллы», таблицей «Кристаллы» и кинофильмом «Строение и свойства кристаллов», коллекцией кристаллов.

Для закрепления материала о кристаллических и аморфных телах используем задачи типа [29, № 749—756; 27, № 596, 597].

2. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Под механическими свойствами тел понимают характеристики поведения тел под действием механических напряжений. Эти свойства существенно зависят от многих факторов: от размеров зерна поликристаллических материалов, текстуры, плотности дефектов кристаллической решетки, формы и размеров тела, скорости испытания и др. Разнообразие типов химической связи между частицами приводит к многообразию механических свойств. Среди них *главными* являются прочность, упругость, пластичность, текучесть. Механические свойства определяются по результатам механических испытаний, среди которых широкое распространение получил метод растяжения образца материала. Учитывая это, при изучении темы целесообразно основное внимание уделить главным механическим свойствам твердых тел, зависимости свойств от структуры тел, а также испытанию их на растяжение.

Вначале напоминаем, что окружающие нас твердые тела и материалы обладают свойством сопротивляться деформированию и разрушению в соответствии со способностью упруго и пластически деформироваться под влиянием внешних механических сил (материал VI класса). При малых деформациях тела возникает упругая сила $\vec{F}_{упр}$, модуль которой определяется законом Гука: $|\vec{F}_{упр}| = k \Delta l$, где Δl — абсолютное значение деформации тела, а k — его жесткость (материал VIII класса).

Объясняем причину возникновения силы упругости на примере деформации модели идеальной кристаллической решетки [69, с. 135]. Главное внимание уделяем трактовке понятий, используемых для количественной характеристики механических свойств: «механическое напряжение», «модуль упругости», «запас прочности», «пределы упругости, текучести, прочности», «диаграмма растяжения». На примере растяжения резины демонстрируем, что упругая деформация есть обратимый процесс, связанный с восстановлением первоначальной формы и размеров тела. Причина этого явления — упругое действие межмолекулярных сил.

Для упругой деформации наблюдается прямо пропорциональная зависимость между *напряжением* $\sigma = \frac{|\vec{F}_{упр}|}{S}$ и *деформацией* ε $\left(\text{обычно принимают, что } \varepsilon = \frac{\Delta l}{l}\right)$. Таким образом, кроме известной учащимся формы записи закона Гука $|\vec{F}_{упр}| = k\,\Delta l$, они знакомятся с новой формой его записи: $\sigma = E\varepsilon$, где E — модуль упругости (иногда эту величину называют также модулем Юнга).

Устанавливаем связь между обеими формами записи закона. Поскольку $\frac{|\vec{F}_{упр}|}{S} = E\frac{\Delta l}{l}$, то $k = E\frac{S}{l}$, где $\frac{|\vec{F}_{упр}|}{S}$ — механическое напряжение. Поясняем, что k — жесткость данного образца, зависящая от его формы и размеров, а E — модуль упругости, характеризующий способность материала к упругой деформации. Чем больше значение E, тем больше способность материала к упругой деформации. Например, при $\Delta l = l$ $E = \sigma$, т. е. модуль упругости равен напряжению, если длина образца изменяется при упругой деформации в два раза. Практически же только резина способна на такую деформацию [6, табл. 5]. Следует заметить, что закон Гука справедлив при деформациях, обычно не превышающих 0,1—0,2%. При бóльших деформациях мы говорим о пределе упругости.

Деформация связана с различным изменением в расположении частиц и расстояний между ними [57, ч. 1, опыт 97]. Используя таблицы видов деформаций, кратко характеризуем их и приводим примеры часто встречающихся видов деформации (растяжение, сжатие, сдвиг, кручение и изгиб) при эксплуатации различных технических конструкций и в быту. В качестве домашнего задания можно предложить учащимся самостоятельно исследовать зависимость степени деформации (например, изгиба стальной линейки, растяжения проволоки или ее кручения и др.) от нагрузки и описать соответствующие изменения в расположении частиц и расстояний между ними при рассмотрении конкретного вида деформации.

Демонстрируем появление остаточной деформации при испытании материала на растяжение [57, ч. 1, опыт 100]. Форма и размеры тела после снятия напряжения уже не восстанавливаются, т. е. остаточная, или пластическая, деформация относится к необратимым процессам.

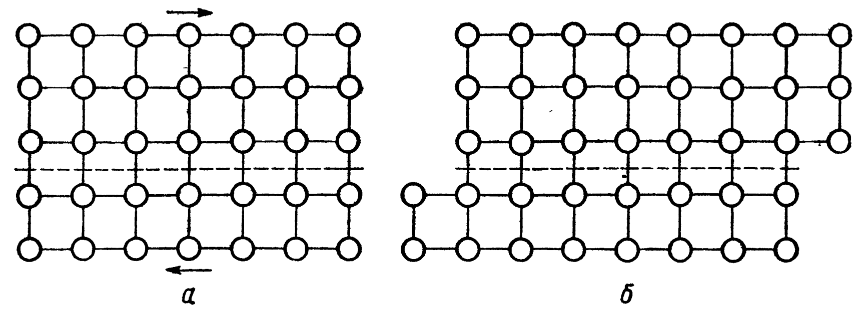


Рис. 7.4

Наглядное представление о пластической деформации дает модель — движение бруска по плоскости. При сдвиговых напряжениях, достаточных для преодоления силы трения, брусок скользит по плоскости. После снятия напряжения брусок не возвращается в прежнее положение. Так и при пластической деформации происходит скольжение атомных плоскостей относительно друг друга (рис. 7.4) [67, рис. 54]. Энергия деформации необратимо переходит в теплоту. При пластической деформации непрерывно нарушаются и восстанавливаются связи между частицами тела в плоскости скольжения. Но образующиеся новые связи между частицами не отличаются от первоначальных.

Кратко останавливаемся на хрупкости некоторых материалов, на практическом применении пластичности таких материалов, как дуралюмин, медь, некоторые сорта стали, пластмассы и др. [69, с. 139]. В области текучести почти при неизменной нагрузке (предел текучести) происходит растяжение образца на 10—15%, что находит большое практическое применение при придании материалу заданной формы в процессе ковки, проката, волочения, штамповки и других видов обработки.

Для обобщения знаний о механических свойствах различных материалов строим диаграмму растяжения — важнейшую характеристику механических свойств материала. Практически не существует материалов абсолютно упругих или пластичных. Если материал разрушается при деформациях порядка 2—5%, его называют хрупким, а при деформациях порядка 20—35% — пластичным, но при этом имеют в виду хрупкие и пластичные свойства материала. Диаграмма растяжения материала позволяет охарактеризовать главные механические свойства материала. К уроку следует подготовить на листе бумаги или спроецировать при помощи кодоскопа на экран диаграммы растяжения (рис. 7.5 и рис.85 из учебного пособия «Физика-9»), рассмотреть их, сравнить отдельные участки [67, с. 82]. Для

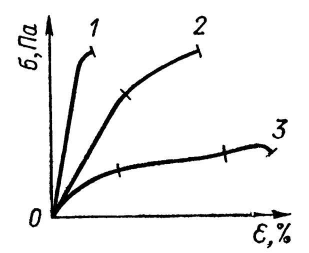


Рис. 7.5

примера полезно сравнить диаграммы растяжения наиболее распространенных материалов (сталь, чугун, кирпич, дуралюмин и др.). Для пластичных материалов характерен тип диаграммы с максимумом и горизонтальным участком, характеризующим текучесть материала (рис. 7.5, кривая *3*), а для хрупких — без максимума и этого участка (рис. 7.5, кривые *1*, *2*). Участок возрастания сопротивления материала пластическим деформациям связан с «наклепом» — упрочнением материала в процессе его деформации. Объясняем наклеп тем, что в процессе пластической деформации периодичность в расположении частиц в плоскостях скольжения нарушается во многих местах (возрастает плотность дефектов кристаллической решетки). Большая плотность дефектов служит препятствием скольжению атомных плоскостей, что приводит к упрочнению материала в процессе его пластической деформации.

Для подготовки школьников к выполнению работы физического практикума «Определение разрушающего напряжения металла» полезно во время демонстраций испытания на растяжение использовать школьный гидравлический пресс, спроецировав образец на экран с помощью универсального проектора [57, т. 1, изд. 2, опыт 31].

При некотором напряжении образец разрушается, т. е. материал обладает определенной прочностью (предел прочности). Полезно рассказать учащимся о запасе прочности и привести соответствующие примеры [5, с. 99].

На уроке используем кинофильм «Механические свойства твердых тел», набор таблиц по деформации, коллекцию материалов (сталь, чугун, кирпич, бетон), обладающих ярко выраженными упругими, пластичными или прочностными свойствами. Для закрепления этих знаний служат задачи типа [29, № 768—772 или 27, № 601—603].

3. ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Задача изучения этого явления состоит в объяснении его на основе молекулярно-кинетических представлений, в ознакомлении с количественным описанием и практическим применением.

Объяснение явления связано с ангармоничностью колебаний частиц в узлах кристаллической решетки. Упрощенно можно дать представление о механизме процесса теплового расширения кристаллических тел, используя график зависимости сил взаимодействия частиц друг с другом от расстояния между ними. При рассмотрении колебаний частицы, окруженной «соседями», учитываем, что силы отталкивания зависят от расстояния между частицами в большей степени, чем силы притяжения. С повышением температуры амплитуда колебаний рассматриваемой частицы возрастает, что, с одной стороны, приводит к сближению частицы с «соседями», а с другой — к удалению их друг от друга. Но силы

отталкивания между рассматриваемой частицей и «соседями» при их сближении больше сил притяжения между частицей и «соседями» при их удалении друг от друга. В результате действия сил взаимного притяжения и отталкивания между частицами при повышении температуры каждая частица удаляется от своих «соседей» больше, чем приближается к ним. Среднее расстояние между частицами тела при повышении его температуры увеличивается, и мы наблюдаем явление теплового расширения тела. Таким образом, тепловое расширение по своему характеру тоже является деформацией, хотя и не вызванной механическим воздействием.

Опыт показывает [52, с. 70], что относительное изменение объема тела $\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{V - V_0}{V_0}$ прямо пропорционально изменению температуры ΔT: $\frac{\Delta V}{V_0} = \beta \Delta T$, где $\beta = \frac{\Delta V}{V_0 \Delta T}$ — температурный коэффициент объемного расширения, ΔV — изменение объема тела по сравнению с его первоначальным объемом V_0.

При тепловом расширении тела изменяются все его размеры. Для описания теплового расширения удлиненных тел (проволок, труб и др.) и анизотропных тел используют температурный коэффициент линейного расширения $\alpha = \frac{\Delta l}{l \Delta T}$, где Δl — изменение длины тела при изменении температуры на ΔT, l_0 — первоначальная длина тела. Для алюминия $\alpha = 2{,}3 \cdot 10^{-5} K^{-1}$, т. е. 1 м алюминиевой проволоки при нагревании на 1 К увеличивает свою длину на $2{,}3 \cdot 10^{-5}$ м. Заметим, что коэффициенты α и β не являются постоянными и могут значительно изменяться при изменении температуры. Если тело изотропно, то $\beta = 3\alpha$. При анизотропии, например, у кварца вдоль одного направления $\alpha_1 = 7{,}8 \cdot 10^{-7} K^{-1}$, а вдоль перпендикулярного к нему направления $\alpha_2 = 14{,}1 \cdot 10^{-7} K^{-1}$. Экспериментальное определение температурных коэффициентов линейного расширения осуществляется методом дилатометрии, с основами которого школьники знакомятся при выполнении соответствующей работы физического практикума.

На применение указанных формул решаем задачи типа [27, № 606—609].

Тепловое расширение тел прежде всего учитывается при конструировании всех установок, приборов и машин. На тепловом расширении основано действие ряда физических приборов, например термометра, биметаллического реле и др. [57, ч.1, опыт 107]. Например, кварц [57, ч.1, опыт 106] и инвар (сплав никеля и железа) известны тем, что у них α мал и практически постоянен в широком интервале температур. Эти материалы получили широкое применение в точном приборостроении. В результате нагревания или охлаждения тела могут возникнуть внутренние механические напряжения, превышающие предел упругости материала, и тело даже может разрушиться [57, ч.1, опыт 105].

4. УПРАВЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ МАТЕРИАЛОВ

В ознакомительном плане желательно дать учащимся некоторое понятие о способах управления свойствами материалов. Вопросы производства и технологии обработки различных материалов рассмотрены в курсе химии IX—X классов. Методика изложения вопроса об управлении механическими свойствами материала дана в работах [5; 15; 67].

Современная наука предлагает управлять свойствами материалов на основе учета зависимости их свойств от строения и условий эксплуатации. Поэтому основное внимание уделяем рассмотрению этой зависимости на примере механических свойств материалов.

Зависимость упругих и пластических свойств твердых тел от способов их механической и термической обработки учащиеся могут пронаблюдать на следующих несложных опытах. Для фронтальной постановки опытов необходимо иметь на каждом столе следующее оборудование: штатив с лапкой, три проволоки длиной 12—13 см и диаметром 1 мм (железную отожженную и неотожженную, алюминиевую и медную), гирьки по 100 г с крючками, небольшую наковальню и молоточек. Опыт проводят так. Вначале в лапке штатива укрепляют поочередно проволоки и к ним подвешивают гирьки (примерно по три гирьки каждый раз) или действуют на них с небольшим усилием пальцами рук. Замечают, что неотожженная железная проволока в этих опытах деформируется незначительно и после снятия напряжения восстанавливает свою форму (выпрямляется). Отожженная проволока сравнительно легко деформируется и после снятия напряжения остается деформированной. Проделав опыт с медной проволокой и замерив ее прогиб под действием гирек массой 100 и 200 г, проковывают ее на наковальне, пока она не станет плоской. После этого опыт повторяют. Учащиеся убеждаются, что после проковки проволока становится более упругой.

На факультативных занятиях можно рассмотреть зависимость физико-механических свойств материалов от способов их обработки (ковка, прокат, отжиг, закалка и т. д.) более подробно, выяснив механизм изменения структуры вещества в процессе обработки.

Желательно провести экскурсию в заводскую лабораторию испытания материалов, в термический или прокатный цех. Такая экскурсия будет способствовать не только углублению и закреплению знаний, но и профориентации школьников.

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

ВВЕДЕНИЕ

Значение и содержание раздела «Электродинамика». Электродинамика — один из важнейших разделов курса физики средней школы, в нем учащиеся получают представление об электромагнитном взаимодействии, о поле как виде материи, о принципе близкодействия. Все это важно для формирования диалектико-материалистического мировоззрения учащихся, их представлений о современной физической картине мира.

Велико значение данного раздела и для политехнического обучения. Электродинамика как раздел науки — физики — является теоретическим фундаментом таких технических наук, как электротехника, радиотехника, многих разделов автоматики и др.

Вопросы электричества и магнетизма изучаются в средней школе как на первой, так и на второй ступенях обучения. Время, выделенное программой на изучение всех этих вопросов, составляет примерно третью часть учебного времени, предусмотренного планом на изучение всего курса физики в средней школе.

В VII классе первоначальные понятия об электричестве и магнетизме учащиеся получают в разделе «Электричество». В IX классе соответствующий раздел называется «Электродинамика». Под электродинамикой понимается наука о свойствах и закономерностях поведения особого вида материи — электромагнитного поля, осуществляющего взаимодействие между электрически заряженными телами.

В настоящее время в разделе «Электродинамика» учащиеся знакомятся только с частными проявлениями электромагнитного поля: электростатическим, магнитным, с переменными электрическими и магнитными полями. Общее понятие электромагнитного поля формируется в следующем разделе программы, носящем название «Колебания и волны».

Особенности электродинамики как раздела науки. Изучение электрических и магнитных явлений имеет весьма длительную и поучительную историю, на деталях которой мы останавливаться не будем, а ограничимся лишь констатацией ряда фактов.

На первых этапах в так называемый дофарадеевский период развития электродинамики в науке господствовал подход к изучению всех явлений, основанный на представлении о дальнодействии. В это время делались попытки объяснить все электродинамические явления как результат взаимодействия покоящихся или движущихся электрических зарядов (электродинамика дальнодействующих сил). Но все эти попытки оказались безуспешными.

Во второй половине XIX в. Джемс Максвелл (1831—1879) обобщил основные законы электрических и магнитных явлений, записав их в виде системы уравнений, носящих теперь его имя. В каждом конкретном случае эти уравнения дают определен-

ное решение, которое описывает то или иное явление. Не рассматривая конкретно эти решения, сформулируем общие особенности электромагнитных явлений, вытекающие из уравнений Максвелла.

а) В уравнениях Максвелла электрическое и магнитное поля связаны между собой. Электрическое и магнитное поля — лишь частный случай проявления одного (единого) *электромагнитного поля*. Возможность наблюдения только электрического или только магнитного полей связана с наличием источников поля и зависит от выбора системы отсчета, что отчетливо показано в теории относительности.

б) В случае электромагнитного поля нельзя рассматривать передачу взаимодействия как мгновенный акт. Взаимодействие передается с конечной скоростью — скоростью света c, значение которой огромно — 300 000 км/с. Электрические и магнитные явления научно правильно могут быть описаны только с точки зрения теории *близкодействия*.

в) Уравнения Максвелла инвариантны к преобразованиям Лоренца, т. е. электродинамика, по существу, является релятивистским разделом курса физики. Ампер установил факт взаимодействия параллельных токов, но объяснить его смогли только на основе специальной теории относительности Эйнштейна. Магнетизм является релятивистским эффектом, который наблюдается уже при $\frac{v}{c} \sim 10^{-12}$.

Эти особенности электродинамики нельзя не учитывать и не подчеркивать в курсе физики средней школы.

Обратим внимание еще на то, что при изучении основ электродинамики учащиеся должны убедиться в ограниченности механических представлений и сделать еще один шаг к современным физическим представлениям.

Особенности электродинамики как раздела учебного предмета. Электродинамические понятия абстрактны и сложны при изучении. Все это требует особых подходов при разработке методики изложения материала.

В огромном многообразии электрических и магнитных явлений ученик сможет разобраться лишь в том случае, если он будет знать теорию, положенную в основу объяснения этих явлений. Такой теорией является теория электромагнитного поля Максвелла, математически выраженная в системе дифференциальных уравнений. Но недостаток математической подготовки учащихся не дает возможность в средней школе рассматривать эти уравнения, решать их. Это не означает, что теория Максвелла не может рассматриваться при изучении электродинамики в средней школе. Все обучение должно быть пронизано идеями теории Максвелла, представлением об электромагнитном поле, о его материальности, о наличии у поля энергии, конечной скорости передачи действия и т. п.

Но теория Максвелла не есть застывшее учение, она развивалась. В первую очередь надо учитывать, что она была создана до появления электронной теории и, естественно, не учитывала атомистического строения электричества.

Впервые электронные представления для объяснения электропроводимости материалов применил Друде. Согласно его представлениям электроны в металле можно рассматривать как электронный газ, подчиняющийся классическим законам движения. Электрическое поле действует на хаотически движущиеся электроны, и они приобретают упорядоченное движение. В процессе перемещения электронов происходит их столкновение с ионами кристаллической решетки металла, что приводит к нагреванию проводника.

Классическая электронная теория Друде не смогла объяснить многие вопросы. Электропроводимость металлов хорошо объясняет только квантовая механика, с идеями которой учащиеся встречаются лишь в конце курса. Поэтому в средней школе целесообразно в основном ограничиться представлениями Друде, т. е. рассматривать классическую электронную теорию, применение которой не вызывает больших затруднений у школьников: эти представления наглядны и доходчивы. Конечно, учащимся следует сказать об ограниченности этой теории.

При изучении электродинамики особое внимание должно быть уделено фундаментальным опытам и исследовательским самостоятельным работам учащихся. Фундаментальные опыты играли основополагающую роль в науке, такова же их роль и в обучении.

В электродинамике фундаментальными являются следующие опыты:

— опыт Кулона (1785—1788 гг.) по установлению зависимости силы взаимодействия двух электрических зарядов от значения этих зарядов и расстояния между ними;

— опыт Эрстеда (1820 г.) по обнаружению действия электрического тока на магнитную стрелку;

— опыт Ампера (1820 г.) по взаимодействию двух проводников с током;

— опыт Ома (1826 г.), вскрывающий характер зависимости между силой тока и напряжением;

— опыты Фарадея (1831—1837 гг.) по электромагнитной индукции;

— опыт Герца (1870—1880 гг.) по получению и обнаружению электромагнитных волн и изучению их свойств;

— опыты Милликена и Иоффе (1912—1913 гг.), подтвердившие атомистическое строение электричества и позволившие измерить элементарный электрический заряд;

— опыты Толмена — Стюарта (1916 г.) (или Мандельштама — Папалекси, 1913 г.), доказывающие электронную природу проводимости металлов.

Некоторые из этих фундаментальных опытов в настоящее время в школе не ставятся; они лишь разъясняются учителем и

иллюстрируются с помощью рисунков. Другие ставятся, но в существенно измененном виде (с использованием современного школьного оборудования). Такую модернизацию фундаментальных опытов можно считать допустимой. Ведь школьники изучают физику, а не историю физики! В настоящее время не имеет смысла в средней школе повторять опыты Фарадея по явлению электромагнитной индукции, пользуясь теми приборами, которые были в распоряжении Фарадея. Это явление легко показать, если применить гальванометры и катушки индуктивности. Однако необходимо учитывать, что при этом у учащихся может создаться впечатление простоты и легкости решения соответствующих научных проблем. Воспроизводя фундаментальные опыты с помощью современного оборудования, необходимо сообщать учащимся, как эти опыты проводились учеными на самом деле, какие были трудности, как они преодолевались.

Постановка опытов Милликена и Иоффе, Толмена — Стюарта, Резерфорда, Кулона в демонстрационном варианте весьма сложна. Для ознакомления с ними учащихся полезны модели и кинофрагменты.

Механизм процессов, происходящих в опытах по электричеству, нельзя непосредственно наблюдать. Демонстрационный эксперимент при изучении электрических явлений иллюстрирует лишь действия электрических зарядов и токов. В связи с этим большую пользу может оказать использование в преподавании моделей и аналогий. В тех случаях, когда непосредственное наблюдение явлений невозможно, с помощью аналогий и моделей создаются так называемые опорные образы, необходимые для формирования понятий.

При этом следует иметь в виду, что использование моделей и аналогий приносит пользу лишь тогда, когда не нарушаются границы их применимости. Надо также иметь в виду, что процесс формирования понятий при обучении весьма длителен, и на разных его этапах не может применяться одна и та же модель. В большинстве случаев в процессе изучения того или иного понятия необходима смена одной модели другой, более совершенной.

Наиболее просты для восприятия материальные модели. Но при изучении электродинамики применяются в основном не материальные, а мысленные модели, для восприятия которых необходим известный уровень развития у учащихся абстрактного мышления.

Такими мысленными моделями являются «свободный электрон», «электронный газ», электронная модель электрического тока в металлических проводниках, движение электронов и дырок в полупроводниках и др.

При изучении электродинамики целесообразно использование аналогий между гравитационным и электростатическим полем, между электрическим током и потоком жидкости и т. п. В ряде случаев для повышения наглядности обучения могут применяться

материальные модели-аналогии, например демонстрационная модель в виде наклонной плоскости для объяснения скачка потенциала и преобразования энергии при протекании электрического тока в замкнутой цепи.

Большая роль в раскрытии механизма электропроводимости в различных средах отводится мультипликационным фильмам. С помощью мультипликации «оживают» на экране представления о «свободных электронах», об «электронном газе», о взаимодействии электронов с ионами кристалла и т. п.

По основам электродинамики в распоряжении учителя имеется довольно много экранных пособий (8 кинофильмов, 9 кинокольцовок и кинофрагментов, 3 диафильма).

Один из путей введения первых представлений об электромагнитном поле в IX классе. Первоначальное понятие об электромагнитном поле можно дать в IX классе в самом начале изучения электродинамики, если в достаточной степени использовать знания учащихся об электрическом и магнитном полях, полученные ими в курсе физики VII класса, о системах отсчета, характере взаимодействия в механике (VIII класс) и т. п.

Ниже показано, как это можно сделать, не нарушая структуру и содержание раздела «Электродинамика» в действующей программе курса физики средней школы.

Выделим в первую очередь возможные этапы формирования понятия электромагнитного поля.

Цель первого пропедевтического этапа — привести в систему знания, полученные в восьмилетней школе; дать первичное «рабочее» определение электромагнитного поля и выдвинуть общую познавательную проблему: изучить свойства электромагнитного поля.

Цель второго этапа — изучение статического и стационарного поля. Здесь учащихся знакомят с основными характеристиками (проявлениями) электрического и магнитного полей, обосновывают их материальность, выясняют роль системы отсчета в некоторых электромагнитных явлениях.

Третий этап посвящен изучению переменного во времени электромагнитного поля в явлении электромагнитной индукции, обобщению и систематизации знаний об электромагнитном поле, раскрытию (показу) относительности понятий электрического и магнитного полей и абсолютности электромагнитного поля.

Цель четвертого этапа — изучение электромагнитных колебаний и волн. Здесь учащихся знакомят с основными идеями теории Максвелла и раскрывают материальность электромагнитного поля.

Заключительный (пятый) этап связан с изучением шкалы электромагнитных волн. На этом этапе раскрывается электромагнитная природа различных излучений (включая оптические). Проводятся дальнейшее обобщение и систематизация знаний по электродинамике.

Сейчас в разделе «Электродинамика» реализуются второй и

третий этапы формирования понятия электромагнитного поля, четвертый и пятый реализуются в курсе физики X класса. Чтобы уровень усвоения свойств электромагнитного поля был более высок, целесообразно ввести в IX классе дополнительный (пропедевтический) этап, который не требует много времени, но делает всю систему работы более стройной, позволяет систематизировать и обобщить изученное в VIII классе по механике, сделает знания учащихся более осознанными.

ГЛАВА 8

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Программой на данную тему выделено 18 ч. Учитывая все сказанное об особенностях изучения раздела «Электродинамика», можно предложить следующее примерное планирование темы:

1-й урок. Введение в электродинамику. Электромагнитное взаимодействие. Особенности электродинамики. Заряд, его основные свойства, инвариантность заряда. Закон сохранения заряда.

2-й урок. Повторение представлений об электрическом и магнитном полях. Электрическое и магнитное поля в разных системах отсчета (покоящихся и равномерно и прямолинейно движущихся относительно электрического заряда и постоянного магнита). Представление об электромагнитном поле. Понятие о близкодействии.

3-й урок. Электростатическое поле. Закон Кулона. Единица заряда.

4-й урок. Силовая характеристика электростатического поля — напряженность. Единица напряженности.

5-й урок. Электростатические поля разных видов (однородное, неоднородное, созданное заряженными шариками, заряженной бесконечной плоскостью и т. п.).

6-й урок. Решение задач на закон Кулона и расчет напряженности различного вида полей.

7-й урок. Проводники и диэлектрики в электрическом поле. Диэлектрическая проницаемость.

8-й урок. Решение задач на закон Кулона и расчет напряженности поля в среде.

9-й урок. Работа сил электрического поля при перемещении заряда. Потенциальность электростатического поля.

10-й урок. Потенциал и разность потенциалов — энергетические характеристики электростатического поля.

11-й урок. Решение задач на расчет работы электрического поля по перемещению заряда.

12-й урок. Связь между напряженностью и разностью потенциалов. Решение задач с использованием понятий напряженности и потенциала электростатического поля.

13-й урок. Понятие электроемкости. Единицы электроемкости.
14-й урок. Электроемкость плоского конденсатора. Решение задач.
15-й урок. Решение задач с использованием понятия электроемкости.
16-й урок. Энергия электрического поля. Решение задач.
17-й урок. Обобщение и повторение материала темы. Электростатическое поле, его особенности и характеристики. Электростатическое поле как частный случай электромагнитного поля. Решение комбинированных задач.
18-й урок. Проверка усвоения учащимися материала темы. (Контрольная работа или урок - конференция по практическому использованию электростатических явлений в технике и сельском хозяйстве.)

Уроки 1-й, 2-й и 17-й представлены в последующих параграфах в развернутом виде, так как на них рассматриваются вопросы, имеющие принципиальное значение, изучение которых способствует более глубокому и осознанному изучению всего раздела.

1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Одним из фундаментальных понятий электродинамики является понятие электрического заряда. Дать словесное определение заряда, сводя его к другим, уже известным школьникам понятиям, нельзя. Таково положение дел в науке. Так, в сборнике рекомендуемых терминов АН СССР дается следующее определение: «Электрический заряд. Свойство частиц материи или тел, характеризующее их взаимосвязь с собственным электромагнитным полем и их взаимодействие с внешним электромагнитным полем; имеет два вида, известные как положительный заряд (заряд протона, позитрона и др.) и отрицательный заряд (заряд электрона и др.); количественно определяется по силовому взаимодействию тел, обладающих электрическими зарядами»[1].

Из этого определения видно, что о заряде судят по электромагнитному взаимодействию тел. Следовательно, понятие заряда в конечном итоге может формироваться только совместно с понятием электромагнитного поля в процессе изучения электродинамики; его сущность раскрывается всеми законами электродинамики. Таким образом, понятием «электрический заряд» учащиеся овладевают постепенно.

[1] Терминология теоретической электротехники. АН СССР, Комитет технической терминологии. Сборник рекомендуемых терминов/Под общей редакцией акад. А. М. Терпигорева. Вып. 46. М., 1958, с. 14.

Рассмотрим, какими знаниями об электрическом заряде должны овладеть учащиеся в результате изучения в первую очередь всего раздела «Электродинамика», а также и других разделов физики.

Заряд и электромагнитное взаимодействие. Наличие заряда у тел (или микрочастиц) проявляется в особом взаимодействии между ними. Для неподвижных заряженных тел (материальных точек) взаимодействие носит кулоновский характер (сила обратно пропорциональна квадрату расстояния между телами). В случае движущихся зарядов сила электромагнитного взаимодействия существенно зависит от модуля и направления относительной скорости. Соответственно этому электромагнитное взаимодействие включает в себя электрическое и магнитное взаимодействия.

В отдельных случаях (в некоторых системах отсчета) электромагнитное взаимодействие проявляется только как электрическое или только как магнитное. Но поскольку скорость тела зависит от системы отсчета, то и взаимодействие носит относительный характер, определяется системой отсчета. Вот почему в общем случае взаимодействие двух заряженных тел является электромагнитным.

Измерение заряда. Существуют разные методы измерения заряда, в которых применяются различные случаи электромагнитного взаимодействия. С некоторыми из них школьники знакомятся в процессе изучения курса физики, например электростатическим (опыт Милликена); электромагнитным (определение удельного заряда электрона на основе измерения силы Лоренца); методом, связанным с измерением силы тока и времени, с явлением электролиза и др. Учащиеся могут получить понятие об определении заряда с помощью исследования спектров (например, на основе квантовой теории Бора), а также об определении заряда ядра атома методом рассеяния заряженных частиц (опыты Резерфорда).

Дискретность заряда. Вся современная физика приводит к выводу о существовании атома электричества — элементарного заряда, являющегося неотъемлемым свойством ряда элементарных частиц — электронов, протонов и др. Есть много доказательств дискретности электричества. С некоторыми школьники знакомы или познакомятся: опыты Милликена, законы электролиза, исследование элементарных частиц. Дискретность заряда (как и массы покоя) элементарных частиц обусловлена одной из существенных особенностей микромира, в котором дискретность присуща и ряду характеристик движения (например, энергии). Поскольку о существовании квантов (неделимых порций) массы и заряда школьники узнают задолго до изучения элементов квантовой физики, очень важно подчеркнуть эту особенность микромира уже при изучении электродинамики. Это создает определенную основу для восприятия идеи квантования в атомной и ядерной физике. Учащиеся должны знать округленные значения элементарного заряда и массы покоя электрона: $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл, $m = 9{,}1 \times \times 10^{-31}$ кг.

Закон сохранения электрического заряда — один из важней-

ших законов современной науки. В IX классе дается следующая формулировка этого закона, учитывающая атомистическое представление о строении электричества: *разность между числом положительно заряженных и числом отрицательно заряженных частиц в замкнутой системе остается неизменной.* Наряду с этой формулировкой можно дать и другую, макроскопическую, основанную на идее возможности измерения заряда: *алгебраическая сумма зарядов в замкнутой системе тел остается неизменной во времени.*

Учащимся должны быть известны следующие доказательства этого закона: а) одновременное появление противоположных по знаку, но равных по модулю зарядов при контактной электризации тел; б) появление двух противоположно заряженных частиц в процессах рождения электронно-позитронной пары, а также превращение электронно-позитронной пары в фотоны; в) сведение любых процессов электризации тел (через влияние, химическая электризация в гальваническом элементе, фотоионизация и др.) к разделению равных по значению зарядов противоположных знаков; г) соотношение между токами в разветвлениях цепи.

Инвариантность заряда. Помимо закона сохранения заряда, очень существенно еще одно свойство заряда — его *абсолютность*, т. е. *независимость от скорости движения заряженной частицы*, а значит, и от системы отсчета.

Учащимся могут быть сообщены некоторые сведения, подтверждающие инвариантность заряда.

Хорошо известен факт нейтральности неионизованных атомов и молекул. Заряды электронной оболочки атома и ядра в точности равны друг другу, хотя характер движения электронов и ядер атомов совершенно различен. Кроме того, известно, что при химических превращениях движение электронов в оболочках атомов изменяется, что приводит к изменению характера оптических спектров. Если бы заряд хоть в малой степени зависел от скорости движения частиц, то в химических реакциях могли бы появляться нескомпенсированные электрические заряды, что можно было бы обнаружить. Так, с величайшей точностью (порядка 10^{-20} e/атом) установлено, что молекулы водорода электронейтральны так же, как атомы гелия. А между тем при одинаковом числе протонов и электронов в молекуле водорода и атоме гелия движения электронов в них совершенно различны.

Другой пример хорошо знаком школьникам из их жизненного опыта. Известно, что при изменении температуры металлов в них нескомпенсированный заряд не появляется, несмотря на то что характер движения электронов и ионов кристаллической решетки различен и при нагревании изменяется по-разному. Тот факт, что тела остаются при нагревании нейтральными, убедительно свидетельствует об инвариантности заряда.

Практика успешной работы ускорителей, разгоняющих протоны и другие заряженные частицы до околосветовых скоростей и

рассчитанных в предположении, что заряд не зависит от скорости, также является убедительным экспериментальным доказательством инвариантности заряда.

Таким образом, заряд не только сохраняется, но и не зависит от системы отсчета, или, как говорят, инвариантен. В этой связи надо заметить, что учащиеся часто отождествляют понятия «сохранение величины» и «инвариантность величины». Следует обратить их внимание на то, что это не одно и то же: величина может сохраняться в данной системе отсчета при всех происходящих в ней превращениях и тем не менее не быть инвариантной. Примерами могут служить энергия, импульс и масса: для всех этих величин существуют законы сохранения, и в то же время они изменяются при переходе от одной системы отсчета к другой, т. е. они не инварианты.

2. МЕТОДИКА ПЕРВОГО (ПРОПЕДЕВТИЧЕСКОГО) ЭТАПА ВВЕДЕНИЯ ПОНЯТИЯ ОБ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

Урок начинается с повторения различных экспериментов по электризации тел, обнаружению двух родов электрических зарядов, при этом в каждом опыте выявляют, по каким признакам можно судить о наличии электрического заряда. При обсуждении этих опытов учащиеся подводятся к выводу, что электрический заряд есть особое свойство частиц, о котором судят по взаимодействию между наэлектризованными телами, состоящими из этих частиц.

Взаимодействие между наэлектризованными телами внешне выглядит как действие тел на расстоянии. Однако такой взгляд на электрические явления, который существовал до создания электродинамики Фарадея — Максвелла, оказался неправильным. Действие одного заряженного тела на другое передается через особую материальную среду, окружающую заряд,— через электрическое поле. Тот факт, что действие одного заряда на другой передается через «посредника», которым является электрическое поле, обнаруживается тогда, когда один из зарядов приводят в движение. Другой заряд «почувствует» это движение не сразу, а через некоторое (правда, обычно малое) время $\Delta t = \frac{r}{c}$ (где r — расстояние между зарядами, c — скорость света). Это время тем больше, чем дальше друг от друга находятся заряды. Значит, перемещение в пространстве «сигнала» о движении одного заряда до второго заряда происходит с конечной скоростью $c = \frac{r}{\Delta t}$. Из этого следует, что между заряженными телами существует материальный «посредник», который и обеспечивает действие одного заряда на другой. Это электрическое поле. Дальше надо сказать, что более общим понятием является понятие об электромагнитном поле.

Реально осуществить опыт с однократным сдвигом заряда нельзя, потому что скорость распространения электромагнитных сигналов очень велика ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с). Из курса механики VIII класса учащиеся уже знают, что это самая большая в природе скорость. Чтобы обнаружить запаздывание «сигнала», необходимо, чтобы смещение заряда было очень быстрым, а расстояние между зарядами — очень большим.

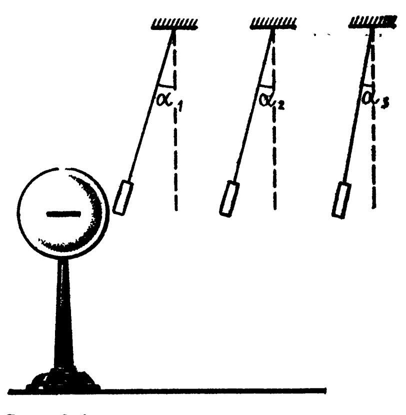


Рис. 8.1

Современной радиотехнике известны способы, позволяющие приводить в быстрые колебательные движения электроны и измерять время распространения электромагнитных сигналов (их называют радиоволнами). На этом основано действие радиолокаторов, работающих по принципу радиоэхо.

Понятия электрического и магнитного полей использовались еще в курсе физики VII класса для объяснения некоторых электрических и магнитных явлений.

В IX классе, опираясь на эти знания и повторяя простые опыты, следует подвести учащихся к первичным характеристикам этих полей.

Пробное заряженное тело, например заряженный пенопластовый листочек, подвешенный на изолирующей нити, подносим к заряженному шару, расположенному на изолирующей подставке. (Пенопласт в некоторых опытах по электродинамике очень эффективен, поскольку обладает хорошими изоляционными свойствами и очень легок.) Опыт показывает, что в разных местах пространства нить отклоняется на разные углы (рис. 8.1); это свидетельствует о различии физических свойств электрического поля в соответствующих точках.

Далее желательно показать, что электрическое поле действует и на движущиеся электрические заряды. Об этом, в частности, можно судить по отклонению луча осциллографа под действием электрического поля заряженной палочки.

Наконец на опыте (см. например, рис. 10.4) в самом общем виде следует пояснить, что магнитное поле не действует на неподвижные заряды, но действует на заряды движущиеся. Более доказательно эти выводы будут получены позднее, при изучении темы «Магнитное поле тока». В данном случае будет достаточно, если учащиеся получат первоначальные представления о том, что на движущиеся заряды могут действовать как электрическое, так и магнитное поля, а на неподвижные — только электрическое.

Подобными опытами подводим школьников к предварительным

определениям полей: а) электрическое поле — это вид материи, специфическим свойством которого является способность действовать на неподвижные заряды; б) магнитное поле — это вид материи, специфической особенностью которого является способность действовать на движущиеся заряды.

Далее можно сообщить учащимся, что современная физика установила взаимосвязь электрических и магнитных явлений и полей. Поэтому в физике говорят о едином электромагнитном поле, а электрические и магнитные поля рассматривают как частные случаи электромагнитного поля. Поэтому также говорят об электромагнитном взаимодействии электрических зарядов.

Электромагнитное поле можно определить как вид материи, специфической особенностью которого является способность воздействовать как на неподвижные заряды, так и на движущиеся электрически заряженные тела (частицы). Законы электромагнитного взаимодействия, а значит, и свойства электромагнитного поля и составляют содержание электродинамики, основы которой изучаются в IX классе.

3. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ. ЗАКОН КУЛОНА И ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ — ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ФУНДАМЕНТ ЭЛЕКТРОСТАТИКИ

Самый простой случай электромагнитного взаимодействия имеет место тогда, когда заряженные тела покоятся в рассматриваемой системе отсчета. В этом случае нет необходимости учитывать магнитные поля, так как на неподвижные заряды магнитное поле не действует.

Закон Кулона и принцип суперпозиции полей выражают основные свойства электростатического поля. Все остальные выводы являются следствиями этих двух экспериментально установленных фактов, которые можно рассматривать как экспериментальные законы. Вся методическая линия при изучении электростатики сводится к тому, чтобы объяснение электростатических явлений базировать на этих двух положениях.

Остановимся на некоторых вопросах, связанных с изучением закона Кулона. В самой формулировке закона Кулона указывается на неподвижность взаимодействующих заряженных тел. Учащимся необходимо разъяснить смысл этого условия. Дело в том, что взаимодействие зарядов осуществляется посредством электромагнитного поля, которое может распространяться в пространстве с конечной скоростью (скоростью света). Время в закон не входит, а входит только расстояние. Всякое смещение одного из зарядов скажется на другом не сразу, а через некоторое время, необходимое электромагнитному сигналу для того, чтобы «пройти» расстояние, разделяющее заряды. В силу этого взаимодействие между за-

рядами не может определяться лишь расстоянием между ними в данное мгновение. Если бы скорость электромагнитного поля была бесконечно большой, то закон Кулона был бы одинаково справедлив как для неподвижных, так и для движущихся зарядов. Но в этом случае понятие электромагнитного поля оказалось бы излишним. Но поскольку электромагнитные сигналы распространяются с большой, но все же конечной скоростью, движущиеся заряды взаимодействуют не так, как неподвижные, и описать это взаимодействие нельзя без рассмотрения электромагнитного поля.

Подобные рассуждения убеждают учащихся в том, что электромагнетизм неразрывно связан с конечностью скорости света или, говоря по-иному, является релятивистским разделом физики.

Внимание учащихся следует обратить также на то, что в формулировке закона Кулона имеется указание на точечность зарядов. Здесь уместно провести аналогию с законом всемирного тяготения, в котором также идет речь о точечности тяготеющих тел. Однако в дальнейшем полезно вернуться к понятию точечности заряда и рассмотреть на простых примерах смысл этого указания. Это можно сделать при повторении электростатики, когда у учащихся уже накопятся знания.

Полезно указать, что поле заряженной плоскости не подчиняется закону обратных квадратов: оно однородно и его действие от расстояния вообще не зависит.

После изучения вопроса о проводниках в электрическом поле полезно рассмотреть пример взаимодействия двух металлических заряженных шаров. Зависит ли сила взаимодействия между шарами от знака зарядов? Согласно закону Кулона, модуль силы взаимодействия между зарядами не зависит от знака зарядов. Однако к заряженным шарам, расстояние между которыми нельзя считать большим в сравнении с их радиусами, закон Кулона непосредственно неприменим. Заряды таких шаров нельзя считать точечными. Со школьниками можно обсудить два различных случая: заряды разноименные, заряды одноименные. В первом случае заряды, взаимно притягиваясь, расположатся ближе друг к другу, чем во втором случае. По этой причине сила взаимодействия разноименных зарядов окажется большей, чем одноименных зарядов. Перераспределение зарядов было бы несущественным, если бы размеры шаров были малы по сравнению с расстоянием между ними. В этом случае заряды можно было бы считать точечными зарядами и сила их взаимодействия в соответствии с законом Кулона не зависела бы от знака зарядов (как, впрочем, и от формы тел).

Хотя закон Кулона справедлив только для точечных зарядов, это не означает, что нет способов его применения тогда, когда заряды нельзя считать точечными. В таких случаях пользуются простым приемом. Разделяют мысленно заряженное тело на отдельные элементы и каждый из них рассматривают как точечный. Затем находят действие каждого из этих точечных элементов на интересующий нас заряд и суммируют все эле-

ментарные силы. Полученная векторная сумма и является искомой силой.

Возможность суммирования действия отдельных зарядов на какой-либо данный заряд — принцип суперпозиции — является опытным фактом. Это должно быть разъяснено школьникам. Учащиеся должны не только понимать и знать физические законы и принципы, но и понимать, что́ является опытным фактом, а что́ — просто логическим следствием. В этой связи следует сказать, что принцип суперпозиции, как и закон Кулона, является именно опытным фактом. Для иллюстрации этого желательно показать учащимся какой-либо простой опыт. Можно понаблюдать за действием заряженного шара на пробный заряд (например, на подвешенную на нити заряженную пенопластовую пластинку). Затем поднести еще один заряженный шар; он окажет свое воздействие на пробный заряд. Если удалить первый шар, то на пробный заряд будет действовать оставшийся второй шар. Подобные опыты убеждают в том, что действия разных зарядов на данный заряд независимы.

Как известно, один из важных путей ознакомления школьников с современными идеями науки состоит в выяснении границ применимости изучаемых законов. Что можно сказать в этой связи о законе Кулона? Косвенные данные позволяют считать закон обратных квадратов верным, по меньшей мере до расстояний в несколько километров. Однако прямых экспериментальных доказательств этого пока не существует. Правда, нет и никаких доводов, которые приводили бы к выводу о неприменимости закона Кулона для расстояний в несколько километров. С другой стороны, опыты по рассеянию заряженных частиц на ядрах (например, опыты Резерфорда и др.) дают основание считать закон Кулона справедливым вплоть до расстояний порядка 10^{-13} см. Следовательно, на электрон в атоме (размер атома порядка 10^{-8} см) действует кулоновское притяжение положительно заряженного ядра.

Закон Кулона можно проиллюстрировать на модели крутильных весов [84, опыт 15, с. 65—66]. Вначале закон записывают в виде $|\vec{F}| \sim \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}$, затем вводят коэффициент k:

$$|\vec{F}| = k\frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}.$$

В зависимости от системы единиц значение k различно. Так, в СИ $k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$,

где электрическая постоянная $\varepsilon_0 = 8{,}8 \cdot 10^{-12}$ Кл^2/(Н $\cdot$ м^2).

Закон Кулона можно сразу записать в единицах СИ в виде $|\vec{F}| = k\frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}$, но сообщить при этом, что опытным путем установлено значение $k = 9 \cdot 10^9$ Н $\cdot$ м^2/Кл^2.

Учащиеся должны знать, что в СИ единица заряда **кулон** (Кл) является производной единицей и определяется как произведение 1 А на 1 с ($I = \frac{q}{t}$, т. е. $q = It$; следовательно, 1 Кл = =1 А · 1 с).

4. НАПРЯЖЕННОСТЬ — СИЛОВАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Напоминаем учащимся, что электростатическое поле действует на неподвижные электрические заряды. Затем сообщаем, что опытным путем было обнаружено, что при внесении различных зарядов q_1, q_2, q_3 и т. д. в точку A поля, созданного зарядом Q (рис. 8.2), отношение силы $\vec{F}$, действующей на внесенный заряд, к значению заряда остается неизменным, т. е. $\frac{\vec{F}_1}{q_1} = \frac{\vec{F}_2}{q_2} = \ldots = \frac{\vec{F}_n}{q_n} = \text{const}$. Эту величину назвали напряженностью электростатического поля и обозначили буквой $\vec{E}$. Напряженность электростатического поля $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$ — векторная величина, так как сила $\vec{F}$ — вектор, а заряд q — скаляр. Направление вектора $\vec{E}$ совпадает с направлением силы $\vec{F}$, действующей на внесенный в эту точку заряд $q > 0$.

Учащимся необходимо разъяснить следующее:

а) Так как отношение $\frac{\vec{F}}{q} = \vec{E}$ в данной точке поля не зависит от значения заряда q, то напряженность является характеристикой поля, в котором находится данный заряд.

б) Вносимый в поле заряд q должен быть таким, чтобы его действием можно было пренебречь. Такой заряд обычно называют пробным. Внесение его в поле заряда Q практически не изменяет это поле.

в) В других точках поле будет характеризоваться другой напряженностью $\vec{E}$. Если во всех точках поля напряженность постоянна, то такое поле называется однородным. В общем случае поле неоднородно и $\vec{E} \neq \text{const}$.

г) Если $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$, то $\vec{F} = \vec{E}q$, т. е. по известной напряженности можно определить силу $\vec{F}$, действующую на электрический заряд, помещенный в данную точку электростатического поля. Это дает право считать напряженность поля $\vec{E}$ *силовой характеристикой электростатического поля.*

При $q > 0$ $\vec{F}$ и $\vec{E}$ совпадают по направлению. При $q < 0$ направления этих векторов противоположны.

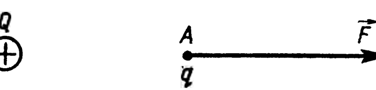


Рис. 8.2

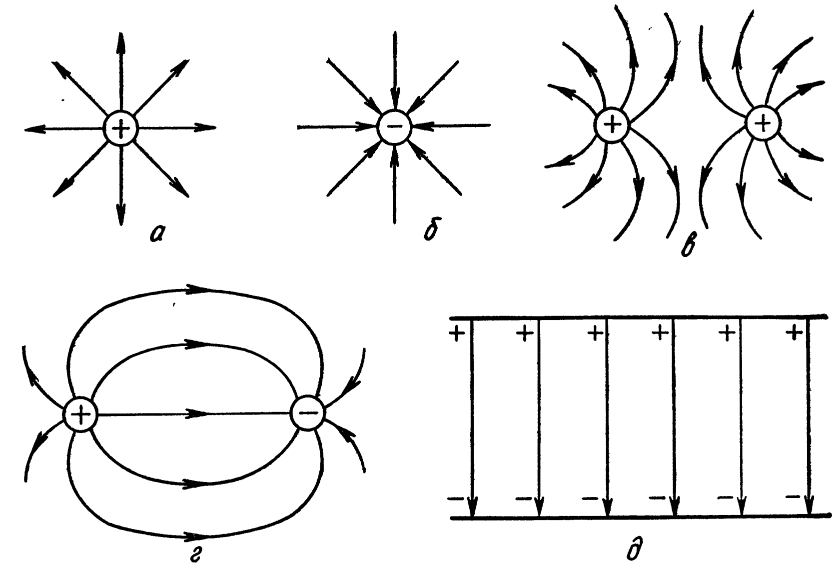


Рис. 8.3

д) Если поле создано несколькими зарядами $Q_1, Q_2, Q_3, \ldots, Q_n$, то каждый заряд создает в данной точке свое поле напряженностью $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3, \ldots, \vec{E}_n$, а общее поле по принципу суперпозиции характеризуется величиной $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \ldots + \vec{E}_n$.

Учащиеся должны понимать, что формула $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$ является, по существу, определением напряженности поля и не меняет свой вид в разных системах единиц. Если же взять частный случай электростатического поля точечного заряда, то по закону Кулона можно определить модуль силы $\vec{F}$, действующей на заряд q в точке, находящейся на расстоянии r от заряда Q: $|\vec{F}| = k\frac{|Q|\cdot|q|}{r^2}$, а значение напряженности в этом случае $|\vec{E}| = k\frac{|Q|}{r^2}$. В СИ $|\vec{E}| = \frac{|Q|}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$ (в вакууме).

Для наглядного схематического изображения электрических полей применяется специальный прием — изображение поля с помощью силовых линий. Условились, что силовая линия — это линия, касательная к которой в любой точке показывает направление вектора $\vec{E}$. Значение модуля вектора $\vec{E}$ условно передают густотой силовых линий (модуль вектора $\vec{E}$ численно равен числу силовых линий, проходящих через поверхность единичной площади, перпендикулярную линиям).

На рисунке 8.3 изображены силовые линии различных электростатических полей, созданных: а) положительно заряженным шариком, б) отрицательно заряженным шариком, в) двумя одноименно заряженными шариками, г) двумя разноименно заряженными шариками, д) между двумя параллельно расположенными и разноименно заряженными металлическими пластинами. С учащимися следует выяснить направление вектора $\vec{E}$ напряженности в разных точках, сравнить модули $\vec{E}$ (по густоте силовых линий) в выбранных для упражнения точках.

5. ПОТЕНЦИАЛЬНЫЙ ХАРАКТЕР ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

В теории поля различают потенциальные и вихревые поля. В школьном курсе физики этому вопросу уделяется значительное внимание. Однако методика его изложения не лишена недостатков. Важнейший из них заключается в том, что данная проблема рассматривается исключительно в энергетическом аспекте.

Так, усвоив энергетическую трактовку потенциальности электрического поля, учащиеся склонны считать, что вихревой характер магнитного поля означает, что работа магнитных сил на замкнутом пути отлична от нуля. Между тем магнитное поле работы при перемещении заряда не совершает!

Чтобы прийти к правильной методике изложения данного вопроса, рассмотрим, какой в действительности смысл должен вкладываться в понятия потенциального и вихревого полей.

Поле любого вектора является потенциальным, если *циркуляция вектора* по любому замкнутому контуру равна нулю: $\oint_l \vec{a}_l \cdot d\vec{l} = 0$. При этом физический смысл интеграла (циркуляции) определяется смыслом вектора $\vec{a}$.

Если под вектором $\vec{a}$ понимается сила, то циркуляция выражает работу этой силы. Вектор напряженности $\vec{E}$ электрического поля имеет смысл силы, действующей на единицу заряда, поэтому циркуляция выражает работу поля при перемещении по замкнутому контуру единицы заряда.

В случае магнитного поля циркуляция вектора индукции $\vec{B}$ по замкнутому контуру не равна нулю:

$$\oint_l \vec{B}_l \cdot d\vec{l} = \mu_0 \mu I.$$

Однако циркуляция вектора $\vec{B}$ не является работой. Это хорошо видно и из размерности правой части приведенной формулы. Дело в том, что вектор $\vec{B}$, хотя и связан с силой, все же отличается от нее по размерности и по направлению (сила перпендикулярна

вектору $\vec{B}$). Таким образом, непотенциальный характер магнитного поля означает, что линии индукции имеют замкнутый характер, а происхождение поля связано с электрическим током.

Электростатическое поле безвихревое. Его линии напряженности незамкнуты. Они начинаются на электрических зарядах или заканчиваются на них. Таким образом, безвихревой характер электростатического поля надо связать с его «происхождением». Электростатическое поле связано с электрическими зарядами.

В отличие от этого магнитное поле порождается токами; линии магнитной индукции охватывают токи и являются замкнутыми; магнитных зарядов не существует. К этим представлениям и надо подвести школьников.

Следует отметить, что одного энергетического анализа потенциальности электростатического поля недостаточно. Энергетическое рассмотрение должно идти параллельно с анализом структуры поля, что должно найти отражение и в соответствующих определениях.

Остановимся подробнее на методике формирования представления о потенциальности электростатического поля.

Определив с учащимися потенциальную энергию заряда в однородном поле и установив независимость работы электростатических сил от формы траектории, полезно проанализировать аналогичную проблему для поля, образованного точечным зарядом. Это позволит выявить, каким особенностям электростатического поля обязан его потенциальный характер, и выпукло показать связь потенциальности поля с фактом существования источников поля — зарядов. Качественное описание сферически симметричного поля, линии которого строго радиальны, достаточно наглядно и просто. Потенциальность электростатического поля связана с фундаментальным законом электростатики — законом Кулона. Из этого закона и может быть получена формула потенциала в любой точке поля точечного заряда.

Анализ электростатического поля точечного заряда очень важен. Если ограничиться рассмотрением только однородного электрического поля, то у учащихся может возникнуть нежелательная ассоциация: «однородное поле — потенциальность». Такая ассоциация, будучи применена к магнитному полю, приводит нередко к затруднениям в понимании того, почему магнитное поле, которое тоже может быть однородным, не является потенциальным. В то же время сферически симметричного постоянного магнитного поля с радиально расходящимися линиями индукции в природе не существует ввиду отсутствия магнитных зарядов. Это и объясняет разницу в свойствах электрического и магнитного полей.

Рассмотрим кратко содержание данного вопроса. Пусть поле создается положительным точечным зарядом (рис. 8.4). Поместим пробный заряд в произвольной точке M (возьмем для определенности положительный пробный заряд). Пусть этот заряд перемещается

под действием поля вдоль радиуса в точку N'. Поскольку перемещение происходит вдоль направления действия силы, работа положительна. Если внешняя сила вернет заряд из N' в M, то работа электрических сил в этом случае будет отрицательной. Очевидно, что работа туда и обратно одинакова по модулю, а суммарная работа равна нулю.

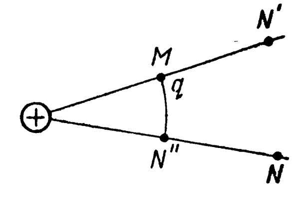


Рис. 8.4

Пусть теперь заряд перемещается из точки M в точку N. Выберем для начала такой путь: вдоль дуги окружности до точки N'', а затем вдоль линии напряженности до нужной конечной точки N. Ясно, что работа определяется только радиальным участком $N''N$, так как вдоль дуги электрические силы направлены перпендикулярно направлению движения заряда. При произвольном перемещении из M в N весь путь может быть представлен состоящим из кусочков радиусов и малых дуг окружностей. Значение работы определяется только радиальным перемещением Δr_{MN}, равным разности радиальных координат конечной и начальной точек траектории. Для простоты считаем, что заряд движется на плоскости; не составит труда распространить эти рассуждения на трехмерный случай.

Учащиеся сами могут разобрать случай, когда траектория выходит за пределы окружностей с радиусами r_M и r_N.

Работа зависит не от формы траектории, а лишь от начальной и конечной точек ее. Совершенно ясно, что если бы поле не было связано с источником (зарядом), то линии его были бы замкнутыми, вследствие чего можно было бы избрать такой путь перемещения заряда, при котором работа не меняла бы знака. Для простоты в качестве примера замкнутой силовой линии возьмем окружность. При движении заряда по этой окружности в одну сторону знак работы на всем пути не будет меняться. В этом случае форма траектории играла бы существенную роль. Такой случай, например, имеет место, если речь идет о силе трения. Сила трения на всей траектории направлена против движения. Ни на одном участке сила трения не станет помогать движению; работа силы трения на всем протяжении имеет один и тот же знак.

С помощью подобных рассуждений подводим школьников к пониманию существа тех свойств электрических сил, благодаря которым их работа не зависит от формы траектории. Это их центральный характер (т. е. их направленность от какого-то центра или к какому-то центру) и зависимость только от координат.

6. МЕТОДИКА ВВЕДЕНИЯ ПОНЯТИЯ «ПОТЕНЦИАЛ»

Установив с учащимися потенциальный характер электрического поля, вводим понятие «потенциал».

Скалярная функция координат $\varphi(x, y, z)$ — потенциал электро-

статического поля — определяется с точностью до произвольной постоянной, одинаковой для всех точек поля.

Потенциал может быть найден, если известно распределение заряда в пространстве. Физический смысл потенциала определяется физическим содержанием вектора $\vec{E}$. Если $\vec{E}$ — силовая характеристика поля, то потенциал φ является энергетической характеристикой. Тот факт, что потенциал задается с точностью до аддитивной постоянной, определяемой выбором нулевого уровня, в известной мере лишает его самостоятельного значения как характеристики отдельных точек поля, хотя полностью с таким утверждением согласиться нельзя. Например, указание всех точек поля, имеющих одинаковый потенциал (эквипотенциальная поверхность), имеет смысл и вполне однозначный! В методическом же отношении, бесспорно, предпочтительнее сначала вводить определение потенциала, а затем уже говорить о разности двух значений этой величины.

Резюмируя сказанное, можно наметить такую последовательность введения понятия потенциала: 1) устанавливают факт независимости работы поля от формы траектории при перемещении заряда из одной точки поля в другую; 2) зафиксировав одну из точек (нулевая точка), характеризуют все остальные точки поля работой по перемещению единичного заряда из исследуемой точки в нулевую точку; эта характеристика — потенциал — имеет смысл потенциальной энергии единичного (положительного для определенности) пробного заряда, помещаемого в данную точку поля; 3) модуль и знак потенциала определяются выбором нулевого уровня; 4) при выборе нулевого уровня в бесконечно удаленной точке пространства потенциалы всех остальных точек поля, созданного положительным зарядом, имеют положительный знак, а потенциалы точек поля отрицательного заряда — отрицательный знак; 5) потенциалы точек поля, связанного с совокупностью зарядов, находятся алгебраическим суммированием потенциалов, созданных отдельными зарядами; 6) под действием поля положительные свободные заряды движутся в сторону уменьшения потенциала, а отрицательные — в сторону увеличения потенциала; 7) линии напряженности электрического поля направлены перпендикулярно эквипотенциальным поверхностям в сторону убывания потенциала, а модуль напряженности равен изменению потенциала на единице длины в направлении действия силы (т. е. вдоль нормали к эквипотенциальной поверхности).

Итак, потенциалом электростатического поля φ называется отношение энергии заряда в поле W_p к значению этого заряда q, т. е.

$$\varphi = \frac{W_p}{q}.$$

Затем вводят понятие разности потенциалов $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$, которая оказывается равной $\frac{A}{q}$, где A — работа поля по переме-

щению заряда из начальной точки в конечную. Следовательно, работа

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Работа определяется изменением потенциала, взятым с противоположным знаком. Поэтому в формуле дается разность $(\varphi_1 - \varphi_2)$ а не $(\varphi_2 - \varphi_1)$.

Необходимо, кроме того, ознакомить учащихся со следующим материалом:

1. Связь между напряженностью поля и потенциалом (для однородного поля $\varphi = |\vec{E}|d$, где d — расстояние между двумя заряженными пластинами, между которыми создано однородное электростатическое поле).

2. Формула потенциала электростатического поля точечного заряда $\varphi = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r}$ — в вакууме (дается без вывода).

3. Потенциальная энергия взаимодействия двух точечных зарядов $W_p = \frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi\varepsilon_0 r}$.

4. Эквипотенциальные поверхности (поверхности с равным потенциалом, нормальные к линиям напряженности электростатического поля).

5. Единица разности потенциалов и методы измерения разности потенциалов.

7. ПРОВОДНИКИ И ДИЭЛЕКТРИКИ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Вопрос о поведении проводников в электростатическом поле несложен для учащихся. Еще из курса физики VII класса им известна модель металлического проводника: ионы, колеблющиеся около своих положений равновесия, и свободные электроны, хаотически движущиеся между ионами.

Если металлический проводник поместить в электростатическое поле, то под действием сил этого поля произойдет электризация проводника. В проводнике свободные заряды будут смещаться таким образом и до тех пор, пока поле внутри проводника не исчезнет, его напряженность $\vec{E}$ станет равной нулю.

Происходящая электризация проводников в электростатическом поле получила название электростатической индукции. На рисунке 8.5 показан проводник, состоящий из двух частей — A и B — и помещенный в электростатическое поле, образовавшееся между параллельными заряженными пластинами. Необходимо с учащимися обсудить следующие случаи:

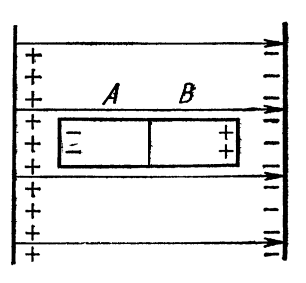


Рис. 8.5

а) Как наэлектризуется внесенное тело? (На конце, расположенном ближе к

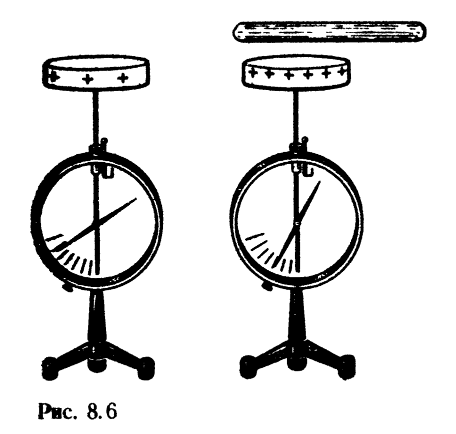


Рис. 8.6

положительно заряженной пластине, возникнет отрицательный заряд, а на другом конце — положительный.)

б) Какое поле будет в проводнике? ($\vec{E} = 0$.)

в) Если вынести тело (обе части A и B) из поля, то что можно будет сказать о его заряде q? ($q = 0$, заряды нейтрализуются.)

г) Вначале части A и B тела в поле разнесли друг от друга, ликвидировав контакт между ними, а потом эти части вынесли за пределы поля. Что можно сказать о заряде этих частей? (Заряд части A отрицательный, обозначим его q_A, а заряд части B положительный, обозначим его q_B. Абсолютное значение этих зарядов одинаково ($|q_A| = |q_B|$), но знак зарядов противоположный.)

В беседе с учащимися должен быть рассмотрен еще вопрос об электростатической защите, т. е. об экранирующем действии проводников [84, опыт 19].

Если в электростатическое поле внести не проводник, а диэлектрик, то произойдет не электризация, а поляризация диэлектрика. Объяснение данного явления более сложно, и имеет смысл его начать с демонстрации [84, опыт 20].

Если незаряженную стеклянную (или из другого диэлектрика) пластину поднести к диску, надетому на стержень заряженного электрометра, то показания электрометра уменьшаются (рис. 8.6). Этот опыт показывает, что внесение диэлектрика в электрическое поле изменяет само поле. Значит, в диэлектрике, находящемся в электростатическом поле, появляются связанные заряды, создающие добавочное электростатическое поле. Других зарядов возникнуть не может, так как в диэлектрике нет свободных зарядов.

Важно подчеркнуть, что в однородном диэлектрике связанные заряды появляются на его поверхности. Внутри диэлектрика индуцированные заряды атомов (молекул) взаимно компенсируются[1]. Такой процесс появления противоположных по знаку связанных зарядов называется поляризацией диэлектрика. Благодаря поляризации диэлектрик как бы превращается в электрический диполь, состоящий из противоположных по знаку, но разделенных некоторым расстоянием зарядов.

Такой диполь в однородном поле может поворачиваться. Поступательно диполь может перемещаться только в неоднородном поле,

[1] В неоднородном диэлектрике появляются и объемные связанные заряды.

когда на его разноименные заряды действуют различные электрические силы.

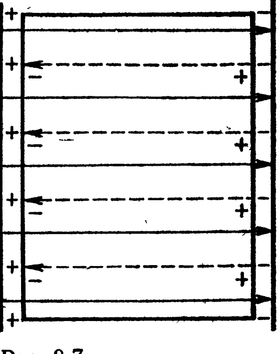


Рис. 8.7

Рассмотрим случай, когда в пространство между параллельными заряженными пластинами вносится твердый диэлектрик, практически заполняющий все это пространство (рис. 8.7). Поле, созданное внешними зарядами, графически изображено сплошными силовыми линиями. Пусть напряженность этого поля $\vec{E}_0$. На гранях диэлектрика возникают связанные заряды, поверхностная плотность которых $\sigma_{св}$. Эти связанные заряды создают свое поле, которое графически изображено пунктирными силовыми линиями; напряженность его обозначим $\vec{E}'$ (учащиеся могут сразу же записать, что $E' = \frac{\sigma_{св}}{\varepsilon_0}$).

Внутри диэлектрика, таким образом, существует два поля: поле, созданное внешними зарядами, напряженностью $\vec{E}_0$ и поле, созданное связанными зарядами, напряженностью $\vec{E}'$. Применяя принцип суперпозиции, получаем:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'.$$

Свойства диэлектрика характеризуются особой величиной, носящей название «диэлектрическая проницаемость»; обозначается она ε. По определению $\varepsilon = \frac{E_0}{E}$.

Поскольку поляризация диэлектрика в целом зависит от поляризации образующих его атомов (молекул), исследование поляризации дает важные сведения о свойствах этих атомов (молекул).

Степень поляризации диэлектрика (как и образующих его структурных частиц) выражает так называемый электрический момент $\vec{p}$. Эта величина характеризует электрический диполь (рис. 8.8). Как известно, диполь состоит из двух равных по модулю и противоположных по знаку зарядов, разделенных некоторым расстоянием l. Электрический момент (его модуль) определяется произведением модуля заряда диполя на расстояние между зарядами:

$$|\vec{p}| = l\,|q|.$$

Имеет значение и то, в каком направлении раздвинуты заряды. Поэтому электрическому моменту приписывают направление вдоль линии, соединяющей заряды, в сторону от отрицательного к положительному заряду.

$\oplus$ —— l —— $\ominus$

Рис. 8.8

Атомы (молекулы) диэлектрика могут быть подразделены на две группы: поляр-

ные и неполярные. Первые имеют электрический момент и в отсутствии электрического поля. Примерами таких молекул являются молекулы оксида углерода, воды и др. Процесс поляризации диэлектриков с полярными молекулами сводится к ориентации молекулярных электрических моментов под действием внешнего поля. Однако ориентации молекул противостоит дезориентирующий процесс теплового движения, вследствие чего на поляризацию диэлектрического тела существенное влияние оказывает температура. С ее повышением диэлектрическая проницаемость вещества уменьшается.

Неполярные атомы (молекулы) не имеют электрического момента в отсутствии электрического поля. Но под воздействием внешнего электрического поля их электронные оболочки деформируются, в результате чего у атомов появляется электрический момент. Такая наведенная поляризация мало чувствительна к температуре. Она значительно менее интенсивна, чем ориентационная поляризация полярного диэлектрика, поскольку даже самые сильные постоянные электрические поля, которые могут быть получены в лабораториях ($|\vec{E}| \sim 10^6$ В/м), значительно слабее полей, обусловленных электрическим взаимодействием между противоположными зарядами атома (молекулы). Так, напряженность электрического поля ядра в области электронной оболочки порядка 10^{11} В/м. По этой причине смещение зарядов в атоме незначительно по сравнению с размерами атома.

Разумеется, наведенная поляризация присуща всем диэлектрикам, однако в полярных диэлектриках она подавляется ориентационным механизмом поляризации.

В случае безграничного однородного диэлектрика взаимодействие зарядов ослабляется в ε раз, где ε — диэлектрическая проницаемость среды. Закон Кулона в этом случае приобретает вид $|\vec{F}| = \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r^2}$ (СИ).

В программу не включено изучение сегнетоэлектриков, но целесообразно на внеклассных или на факультативных занятиях ознакомить учащихся с этим очень интересным классом диэлектриков, свойства которых аналогичны свойствам ферромагнетиков. Для сегнетоэлектриков характерны большие значения диэлектрической проницаемости и зависимость последней от напряженности поля $\vec{E}$ и от температуры. Для них имеет место (как и для ферромагнетиков) исчезновение характерных свойств при температурах, равных и больших, чем так называемая температура Кюри. Заслуживают внимания опыты с сегнетоэлектриками.

8. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЕМКОСТЬ

До сих пор учащиеся рассматривали различные характеристики электростатического поля. Характеристикой проводников, помещаемых в электростатическое поле, является величина, полу-

чившая название «электрическая емкость»; обозначается она буквой C.

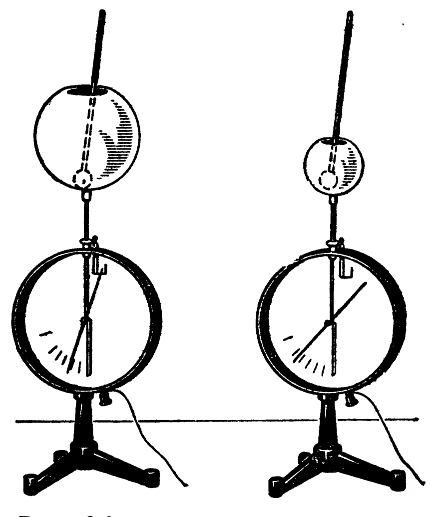


Рис. 8.9

Существуют различные способы введения понятия электроемкости в средней школе, а именно:

а) вводится электроемкость уединенного проводника;

б) вводится электроемкость системы проводников или, конкретно, электроемкость конденсатора.

Конечно, уединенный проводник — своего рода идеализация, но с идеализацией учащиеся встречаются не первый раз. Если учитель раскроет, что́ понимается под «уединенным» проводником, то можно пойти по первому пути. Это целесообразно еще и потому, что учащиеся уже имеют понятие о потенциале.

В случае определения электроемкости конденсатора используется понятие разности потенциалов и этот путь единственный, если учащиеся знают только понятие разности потенциалов, а понятие потенциала (как не совсем определенное из-за произвольности выбора нуля потенциала) им не давалось.

Наряду с изложенным в учебном пособии [2, с. 139] возможен следующий метод введения понятия об электроемкости. Понятие электроемкости вводим экспериментальным путем, на основе наблюдения за изменением показаний электрометра, измеряющего потенциал, при перенесении равных зарядов на полые металлические шары, надетые на стержни электрометров (рис. 8.9). Данный опыт подробно описан в литературе [84, опыт 24, с. 77 и 78].

Передавая пробным шариком каждый раз заряд q, можно заметить возрастание потенциала, но

$$\frac{q}{\varphi_1} = \frac{2q}{2\varphi_1} = \frac{3q}{3\varphi_1} = \; ... \; = \frac{nq}{n\varphi_1} = \text{const}'$$

для одного электрометра с большим шаром и

$$\frac{q}{\varphi_2} = \frac{2q}{2\varphi_2} = \frac{3q}{3\varphi_2} = \; ... \; = \frac{nq}{n\varphi_2} = \text{const}''$$

для другого электрометра с малым шаром. Кроме того, обращаем внимание на то, что $\varphi_1 < \varphi_2$.

Величина $\frac{q}{\varphi} = C$ не зависит от заряда, а определяется лишь геометрическими размерами проводника (потом будет показано, что она зависит еще от формы проводника и электрических свойств окружающей среды).

Эту величину C, равную отношению заряда q, сообщенного проводнику, к его потенциалу φ, называют электроемкостью проводника $\left(C = \frac{q}{\varphi}\right)$.

Зависимость электроемкости от размеров тела видна из опыта (емкость большого и малого шаров разная). Влияние среды легко обнаружить, если к электрометру поднести какой-нибудь диэлектрик или просто руку. Это в то же время свидетельствует и о зависимости электроемкости от окружающих тел.

Учащимся объясняют, что́ представляет собой конденсатор, и показывают опыты, демонстрирующие зависимость электроемкости C конденсатора от площади S его пластин, расстояния d между пластинами и от электрических свойств диэлектрика, разделяющего пластины конденсатора. Эти свойства диэлектрика характеризуются величиной ε. В результате обсуждения этих опытов [84, опыт 25, с. 78 и 79] получают, что электроемкость C конденсатора равна $C = \frac{\varepsilon S}{d}$.

Не останавливаясь подробно на методике изложения материала, перечислим еще вопросы, разбор которых необходим на уроках:

а) Единицы электроемкости и соотношение между ними (фарад, микрофарад, пикофарад).

б) Различные виды конденсаторов.

9. ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Представление об энергии электростатического поля — очень существенный шаг в толковании электрических явлений. Все, о чем говорилось до сих пор, можно хорошо согласовать как с идеей близкодействия, что мы и делали, так и с представлениями о дальнодействии. Но наличие энергии в каком-то месте пространства имеет только одну интерпретацию — полевую. Энергии без материи не существует!

Энергию взаимодействия системы зарядов можно вычислить с помощью следующих формул:

$$W_p = \frac{1}{2}\int\limits_V \rho\varphi dV + \frac{1}{2}\int\limits_S \sigma\varphi dS, \qquad (1)$$

$$W_p = \frac{1}{2}\int\limits_V \varepsilon_0\varepsilon E^2 dV, \qquad (2)$$

где ρ и σ — соответственно объемная и поверхностная плотности зарядов. Формулы (1) и (2) в математическом отношении совершенно эквивалентны, одна может быть получена из другой. Обе формулы выражают полную энергию взаимодействия зарядов; это их потенциальная энергия. Но в формулу (1) входят объемная и поверхностная плотности зарядов. Эта формула не исключает трактовки энергии электрического взаимодействия зарядов как принадлежащей самим зарядам, т. е. с позиций дальнодействия. Формулу же (2) можно трактовать по-иному: энергия взаимодействия зарядов «рассредоточена» в пространстве с объемной плотностью

$$w = \frac{1}{2}\varepsilon_0 \varepsilon E^2. \qquad (3)$$

Носителем этой энергии является само электрическое поле. В электростатике прямого экспериментального доказательства наличия энергии у электрического поля не существует. Ведь в электростатике рассматриваются лишь постоянные во времени поля. А если материальный объект не обменивается энергией с другими объектами, то «узнать» об этой энергии нет возможности: она не проявляет себя. Проверка наличия энергии у поля возможна только в электродинамике при рассмотрении изменения полей. Поэтому можно наметить следующий методический подход к изложению вопроса об энергии поля.

Электрические заряды в поле приобретают энергию, которая при этом может превращаться в кинетическую энергию движущегося заряда. Примерами могут служить опыты с электронными пучками в электроннолучевой или катодной трубках. Тот факт, что заряженная частица приобретает в электрическом поле кинетическую энергию, приводит к выводу, что источником этой энергии является электрическое поле. В реальных опытах поле, совершая работу над зарядами, теряет энергию, а его напряженность уменьшается. В школе можно поставить следующий опыт (рис. 8.10). Зарядим пластины плоского демонстрационного конденсатора, предварительно подключив к ним электрометр. Подвесим на шелковой нити маленький проводящий шарик (можно взять легкий шарик для пинг-понга и покрыть его поверхность проводящим слоем, например слоем графита). Зарядив шарик, внесем его в поле конденсатора. Шарик притянется к одной из пластин и, коснувшись ее, оттолкнется; при-

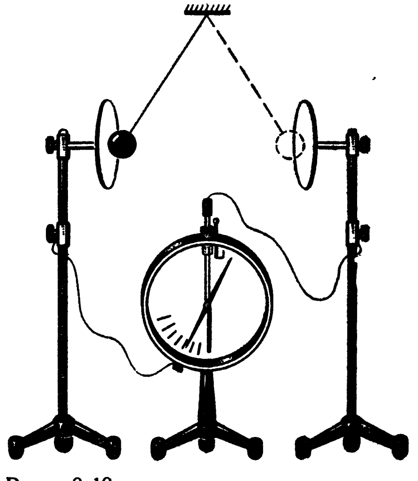


Рис. 8.10

близившись к другой пластине, он перезарядится и снова оттолкнется и т. д. По мере передвижения шарика поле постепенно ослабевает, о чем свидетельствуют показания электрометра. Опыт хорошо иллюстрирует тот факт, что перемещение зарядов сопровождается потерей энергии полем.

Однако и в этом эксперименте непосредственно не видно, что энергия шарику отдается полем. Опыт лишь доказывает, что перемещение заряда в поле сопровождается изменениями в системе зарядов, а также в свойствах поля.

Лишь в радиотехнике мы имеем дело с уменьшением зарядов на обкладках конденсатора вследствие излучения электромагнитных волн, которые могут распространяться на большие расстояния, перенося энергию. Полезно, не вдаваясь в подробности этого процесса, продемонстрировать свечение лампочки на расстоянии от генератора СВЧ. Излученная волна вызывает ток в приемной антенне. При этом энергия поля превращается в кинетическую энергию зарядов. В космических системах связи волна проходит расстояния в миллионы километров и достигает приемной антенны через несколько минут после излучения. Поле, таким образом, может существовать и без зарядов, перенося энергию.

При помощи рассуждений и простых демонстраций разъясняем учащимся, в чем заключается обоснование современной наукой наличия у поля энергии, а значит, и реальности поля. Далее возникает методическая проблема: как добиться понимания учащимися формулы для плотности энергии электрического поля.

Педагогический опыт показывает, что учащиеся решают этот вопрос неправильно, исходя из понятия потенциала: они считают, что потенциал в данной точке поля и характеризует энергию поля. В связи с этим должны быть приведены следующие разъяснения. Потенциал определяет энергию какого-либо заряда, помещаемого в данную точку поля. Пусть поле создается совокупностью заряженных тел Q_1, Q_2, ... В поле этих зарядов (например, в точку M) поместим пробный заряд q, обладающий потенциальной энергией $W_p = q\varphi_M$. Эта энергия равна работе, которую поле совершит, перенося пробный заряд из точки M в условно выбранную нулевую точку O. Можно ли сказать, что вся энергия поля, сосредоточенная в окрестности точки M, равна потенциальной энергии пробного заряда? Конечно, нет. Пробный заряд может быть большим или меньшим, а энергия поля от этого не зависит. Кроме того, выбором нулевого уровня потенциал может быть вообще сделан в точке M каким угодно по модулю и по знаку. А самое главное состоит в том, что нас интересует не энергия пробного заряда, а энергия совокупности зарядов Q_1, Q_2, ..., создающих данное поле, внутренняя энергия системы. Наконец, для переменных полей, как известно, понятие потенциала (в том смысле, который подразумевается в электростатике) вообще не применимо (эти поля не потенциальны). Понятие же напряженности применимо для всех полей.

Все эти доводы говорят о том, что энергию поля нужно выражать через напряженность поля, а не через потенциал. Такую проблему и следует поставить перед учащимися, приступая к рассмотрению вопроса об энергии электростатического поля. Здесь также очень полезна аналогия с гравитационным полем.

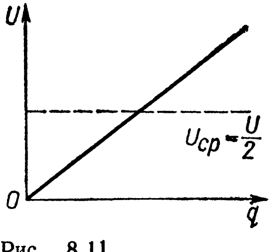


Рис. 8.11

Выражение для энергии заряженного конденсатора можно вывести на основе следующих положений. Энергия конденсатора равна работе по перенесению всего заряда Q по цепи (если заряженный конденсатор разрядить). Из соотношения $C = \frac{q}{U}$ или $U = \frac{q}{C}$ видно, что $U \sim q$, т. е. можно эту зависимость изобразить графически (рис. 8.11). Зависимость линейная и при разряде конденсатора разность потенциалов U будет меняться, но можно считать, что все время действует напряжение $U_{\text{ср}} = \frac{U}{2}$. Тогда $W_e = A = QU_{\text{ср}}$. Но $U_{\text{ср}} = \frac{U}{2}$, а $Q = CU$, так что

$$W_e = \frac{CUU}{2} = \frac{CU^2}{2}.$$

В связи с рассмотрением этих вопросов можно показать демонстрации, описанные в пособии [84, опыты 21, 30, 31].

Учащиеся могут сами получить другое выражение для энергии электростатического поля, пользуясь известными соотношениями:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d} \text{ и } U = Ed.$$

Тогда

$$W_p = \frac{CU^2}{2} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d} \cdot \frac{E^2 d^2}{2} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} Sd.$$

Но $Sd = V$ (объем, занятый полем). Поэтому на единицу объема приходится энергия $w = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2}$, получившая название объемной плотности энергии. Вся энергия $W_e = wV$.

10. О РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ПО ЭЛЕКТРОСТАТИКЕ

При изучении электростатики решение задач имеет принципиально важное значение, так как этот материал довольно абстрактен и необходима его конкретизация и иллюстрация на задачах и упражнениях.

Тренировочные задачи, в которых используются готовые формулы, не вызывают у учащихся затруднений. Они необходимы для

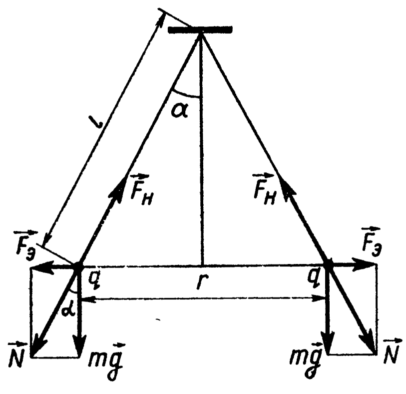


Рис. 8.12

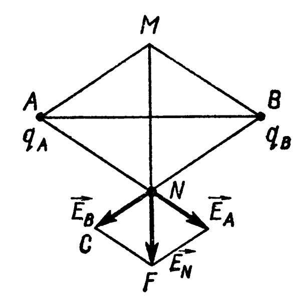


Рис. 8.13

лучшего запоминания основных зависимостей между величинами и для упражнения в действиях с единицами электростатических величин.

Чрезвычайно важное значение имеют задачи комбинированные, в которых используются разные зависимости из электростатики или даже материал из других разделов, например механики. Рассмотрим некоторые задачи, взяв в качестве примеров наиболее типичные.

Задача 1. Два маленьких шарика массой по 0,01 г подвешены рядом на тонких нитях длиной по 50 см. Шарики зарядили равными одноименными зарядами, и они оттолкнулись друг от друга на расстояние 7 см. Определить заряды шариков. [29, № 578.]

Решение. Анализируя условие задачи, принимаем заряды за точечные, а диэлектрическую проницаемость воздуха $\varepsilon = 1$. Делаем чертеж (рис. 8.12). На каждый из шариков действуют три силы: сила электрического взаимодействия $\vec{F}_э$, сила тяжести $m\vec{g}$ и сила натяжения нити $\vec{F}_н$. Условие равновесия шариков:

$$\vec{F}_э + m\vec{g} + \vec{F}_н = 0.$$

Воспользуемся тем, что равнодействующая сил $\vec{F}$ и $m\vec{g}$ — сила $\vec{N}$ — равна по модулю и противоположна по направлению силе $\vec{F}_н$. Тогда угол между $\vec{N}$ и $m\vec{g}$ равен α.

В дальнейшем можно не оперировать векторами, а вычислять лишь их модули.

По закону Кулона $|\vec{F}_э| = \dfrac{q^2}{4\pi\varepsilon_0 \cdot \varepsilon r^2}$. С другой стороны $|\vec{F}_э| = m|\vec{g}|\,\mathrm{tg}\,\alpha$. При малом угле $\alpha\left(\dfrac{r}{2} \ll l\right)$

$$\operatorname{tg}\alpha \approx \sin\alpha = \frac{r}{2l}.$$

Получаем уравнение $\frac{q^2}{4\pi\varepsilon_0 r^2} = m|\vec{g}|\frac{r}{2l}$, откуда $q = \sqrt{\frac{m|\vec{g}|r^3 4\pi\varepsilon_0}{2l}}$. Подставив значения всех величин, получим: $q \approx 2 \cdot 10^{-9}$ Кл.

Задача 2. Два заряда по 1,0 · 10^{-8} Кл находятся в воздухе на расстоянии 8 м друг от друга. Найти напряженность на расстоянии 5 м от обоих зарядов. [29, № 594.]

Решение. Сделав рисунок (рис. 8.13), убеждаемся, что таких точек две (M и N). Проведем решение для одной из них, например для точки N. Заряды q_A и q_B равны друг другу. Напряженность поля, созданного зарядом q_A в точке N, обозначим $\vec{E}_A$, а созданного зарядом q_B — $\vec{E}_B$. Общая напряженность $\vec{E}_N$ находится как векторная сумма:

$$\vec{E}_N = \vec{E}_A + \vec{E}_B.$$

Напряженности $|\vec{E}_A| = |\vec{E}_B| = \frac{|q_A|}{4\pi\varepsilon_0(AN)^2}$. $|\vec{E}_N|$ находим, воспользовавшись подобием треугольников AMN и CNF. Вычисления дают

$$|\vec{E}_N| = |\vec{E}_M| \approx 4{,}3 \text{ Н/Кл}.$$

Задача 3. Поле создано двумя одинаковыми положительными зарядами q_1 и q_2, находящимися на расстоянии r друг от друга. Чему равны напряженность и потенциал в средней точке прямой, соединяющей эти заряды? [29, № 599.]

Решение. В средней точке $\vec{E} = 0$, а потенциал $\varphi \neq 0$, так как общий потенциал φ равен алгебраической сумме потенциалов $\varphi_1 = \frac{q_1}{4\pi\varepsilon_0 \frac{r}{2}}$ и $\varphi_2 = \frac{q_2}{4\pi\varepsilon_0 \frac{r}{2}}$, созданных зарядами q_1 и q_2 в этой точке. Диэлектрическую проницаемость воздуха считаем равной 1.

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 = \frac{Q}{\pi\varepsilon_0 r}, \text{ где } Q = q_1 = q_2.$$

Задача 4. Определить энергию и скорость, которую приобретает электрон, пролетевший в электрическом поле ускорителя от точки с потенциалом φ_1 до точки с потенциалом φ_2, если $\varphi_2 - \varphi_1 = -2 \cdot 10^4$ В. [29, № 604.]

Решение. Работа электрического поля $A = -e(\varphi_2 - \varphi_1)$, где $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Кинетическая энергия электрона $\frac{mv^2}{2}$ ($m = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг) равна этой работе A, так что $v = \sqrt{\frac{-2e(\varphi_2 - \varphi_1)}{m}}$.

Расчеты дают $\frac{mv^2}{2} = 3{,}2 \cdot 10^{-15}$ Дж, $v = 8{,}3 \cdot 10^9$ м/с.

11. РАЗЛИЧНЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

По вопросам электростатики в целях развития политехнического кругозора учащихся целесообразно провести урок-конференцию.

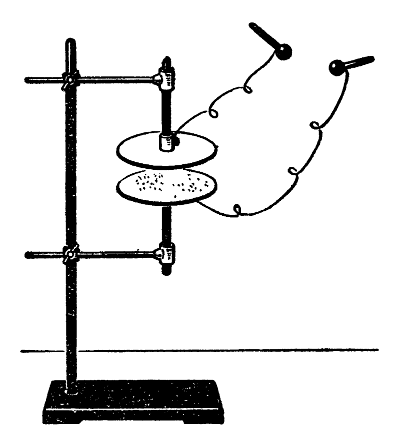
В докладах учащихся должны найти отражение примеры практического использования электризации (изготовление наждачной бумаги, окраска металлических изделий, очистка воздуха от пыли и легких частиц и др.).

Ниже опишем два примера таких применений, о которых можно не только рассказать, но и показать на простейших моделях.

Принцип покрытия наждачным порошком бумаги и получения искусственных ворсистых материалов можно пояснить на опыте с установкой, представленной на рисунке 8.14. В опыте применяют диски от раздвижного конденсатора, соединенные с кондукторами электрофорной машины. На нижний диск насыпают песок или узкие полоски тонкой цветной бумаги. Поверхность верхнего диска смазывают клеем. Приведя в действие электрофорную машину, заряжают диски. При этом кусочки бумаги или абразивный порошок, находящиеся на нижнем диске, получив заряд такого же знака, что и этот диск, под действием сил электростатического поля притягиваются к верхнему диску и оседают на нем.

Представление об электростатическом методе окраски учащиеся могут составить из следующего опыта.

Для опыта используют пульверизатор (рис. 8.15), нагнетая с помощью груши воздух. Находящаяся в колбе подкрашенная жидкость поднимается вверх по трубке и, распыляясь в воздухе, попадает на экран *1*. Сбоку от струи располагают экран *2* и сообщают ему положительный заряд от электрофорной машины. Капельки красителя будут притягиваться к этому экрану, окрашивая его.



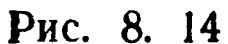


Рис. 8. 14

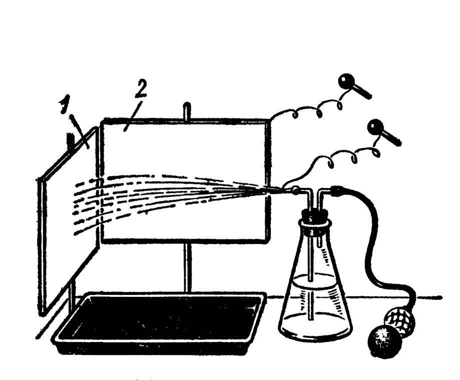


Рис. 8.15

Затем металлической трубке пульверизатора сообщают отрицательный заряд, соединив ее с другим кондуктором электрофорной машины. Капельки красителя становятся более мелкими и ложатся на экран, имитирующий окрашиваемую деталь, ровным слоем.

Экран-деталь изготовляют из проводящего материала. Чтобы улучшить условия видимости опыта, сверху на экран наклеивают лист белой бумаги (для этого достаточно лист слегка смочить водой).

С отрицательными явлениями, вызываемыми электризацией, сталкиваются на ткацких фабриках, где электризация волокон вызывает взаимное их отталкивание, что затрудняет работу станков. В типографиях электризуются бумажные листы, что мешает их движению и укладке. Особенно опасна электризация при транспортировке и перекачке легко воспламеняющихся жидкостей. Поэтому, например, бензовозы для предотвращения взрыва заземляют скользящей по земле цепью или оборудуют баллонами из токопроводящей резины. Самолеты при заправке горючим обязательно заземляют.

Если урок-конференция по данной теме по каким-либо причинам проводиться не будет, необходимо основные сведения о роли и применениях явления электризации в технике и сельском хозяйстве дать на уроках, продемонстрировать учащимся описанные выше опыты, порекомендовать им литературу для самостоятельной работы [78].

ГЛАВА 9
ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

Тема «Постоянный электрический ток» разделена на две большие части: «Законы постоянного тока» (12 ч) и «Прохождение электрического тока через различные среды» (20 ч).

Законы постоянного тока

Данный материал должен излагаться с опорой на знания об электрической цепи, на понятия силы тока, напряжения и сопротивления, полученные учащимися в курсе физики VII класса. При этом необходимо углубление этих знаний, их расширение и обобщение.

По рассматриваемой части темы можно рекомендовать следующее планирование учебного материала:

1-й урок. Условия, необходимые для существования электрического тока. Скорость упорядоченного движения электронов в проводнике. Стационарное электрическое поле, его отличия от электростатического поля.

2-й урок. Сторонние силы. Электродвижущая сила. Электрическая цепь, ее основные элементы.

3-й урок. Закон Ома для участка цепи. Зависимость сопротивления от температуры. (Сверхпроводимость.)

4-й урок. Решение задач на закон Ома для участка цепи и зависимость сопротивления от температуры.

5-й урок. Лабораторная работа «Определение удельного сопротивления проводника».

6-й урок. Последовательное и параллельное соединение проводников.

7-й урок. Решение задач на определение сопротивления различным образом соединенных проводников.

8-й урок. Работа и мощность электрического тока. Решение задач.

9-й урок. Закон Ома для замкнутой цепи. Различия между ЭДС, напряжением и разностью потенциалов.

10-й урок. Лабораторная работа «Определение ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока».

11-й урок. Решение задач на законы Ома для участка и замкнутой цепи.

12-й урок. Обобщение и повторение материала. Контрольная работа.

1. УСЛОВИЯ СУЩЕСТВОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА В ЦЕПИ

Для существования постоянного тока в электрической цепи необходимо обеспечить следующие условия:

а) наличие электрического поля;

б) наличие в цепи свободных носителей электрического заряда;

в) замкнутость электрической цепи.

Первые два условия необходимы для существования любого электрического тока, а последнее — только для постоянного тока.

В основу изучения условий существования тока в IX классе надо положить первоначальные знания о токе, полученные учащимися в курсе физики VII класса, и опираться в процессе работы на демонстрации опытов, иллюстрирующих условия существования тока. Первый опыт показан на рисунке 9.1. При соединении электрометров проводником протекает кратковременный ток, соответственно кратковременно вспыхивает неоновая лампочка, а отклонения стрелок электрометров становятся одинаковыми.

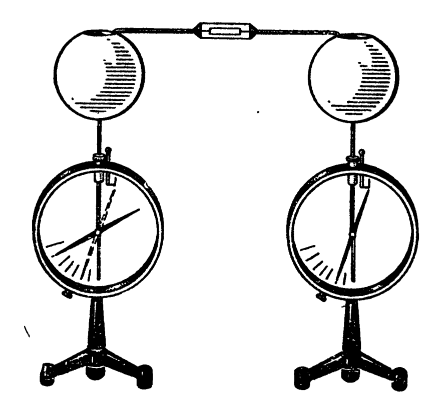


Рис. 9.1

После этого возникает естественный вопрос: «Как получить длительно существующий электрический ток?» Учащиеся без труда делают вывод, что для

этого необходимо постоянно поддерживать электрическое поле между электродами. Только при этом условии электрические заряды все время будут двигаться в проводнике. Чтобы подтвердить справедливость этого вывода, демонстрируют опыт, в котором неоновую лампу непосредственно присоединяют к кондукторам электрофорной машины. При вращении ручки машины неоновая лампочка светится непрерывно, что доказывает существование электрического поля и возникающего под действием его постоянного тока. Вместо электрофорной машины можно применять высоковольтный выпрямитель [84, с. 94 и 95].

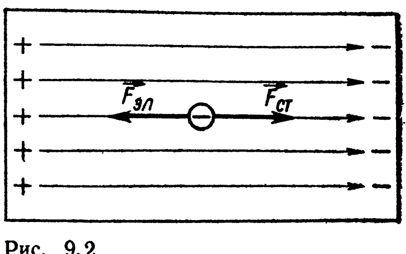


Рис. 9.2

Теперь есть все предпосылки для введения понятия о сторонних силах. В результате действия сторонних сил, которые создаются источником тока, в цепи происходит разделение электрических зарядов. Эти силы имеют не электростатическое происхождение. Данное объяснение целесообразно сопровождать схемами и рисунками, что даст возможность его конкретизировать и сделать более понятным и доступным.

Электрическая цепь имеет при наличии источника тока внутренний и внешний участки цепи. Обратимся вначале к рассмотрению сил, действующих на электроны на внутреннем участке цепи.

Сторонние силы внутри источника тока разделяют заряды, которые скапливаются на его полюсах. По мере накопления зарядов на полюсах растет напряженность электрического поля внутри источника тока, которое действует на электроны с силой $\vec{F}_э$. Когда сила $\vec{F}_э$ станет равной силе $\vec{F}_{ст}$, которую обеспечивают сторонние силы, перемещение зарядов внутри источника прекратится (рис. 9.2).

Надо обязательно обратить внимание учащихся на то, что с энергетической точки зрения внутри источника совершается работа сторонних сил, т. е. происходит преобразование различных видов энергии в энергию электрического поля. Так, например, в химических источниках тока за счет химических реакций в электрическую энергию превращается внутренняя энергия реагирующих веществ, в индукционных генераторах в электрическую энергию превращается механическая энергия двигателя.

При замыкании внешней цепи электрическое поле, возникающее во внешних соединительных проводниках, приводит электроны в движение, в результате чего заряды должны нейтрализоваться. Но этого не происходит. Как только начинает нарушаться равновесие сил внутри источника тока, сразу же начинают работать сторонние силы и на зажимах источника тока опять устанавливается постоянная разность потенциалов.

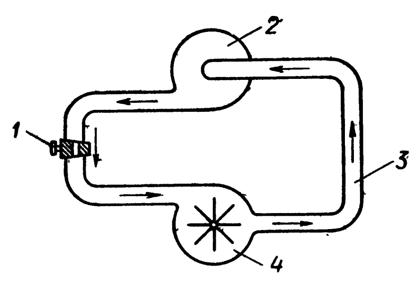


Рис. 9.3

Процессы, происходящие в электрической цепи, помогает понять гидродинамическая аналогия электрической цепи и механическая модель электрической цепи.

Электрическая цепь в определенном смысле аналогична замкнутой гидродинамической системе, в которой циркулирует вода (рис. 9.3). Насос *2* в этом случае является аналогом источника тока, гидродинамическая вертушка *4* — аналогом потребителя энергии, соединительные трубки *3*, заполненные водой,— аналогом соединительных проводников, а кран *1* — аналогом ключа в электрической цепи. Установка для демонстрации гидродинамической аналогии электрической цепи показана на рисунке 9.4.

С учащимися целесообразно с помощью гидродинамической аналогии разобрать следующие вопросы:

1) Какова роль источника тока в электрической цепи? (Не создает заряды, а приводит их в движение, создает электрическое поле в проводниках.)

2) Где должен находиться ключ в электрической цепи? (В любом месте, так как его роль сводится к разрыву и замыканию цепи.)

3) Какие электрические заряды движутся в электрической цепи? (Электрические заряды, имеющиеся в проводниках, а не заряды, как бы «создаваемые» источником тока.)

4) Есть ли различие между такими понятиями, как «скорость

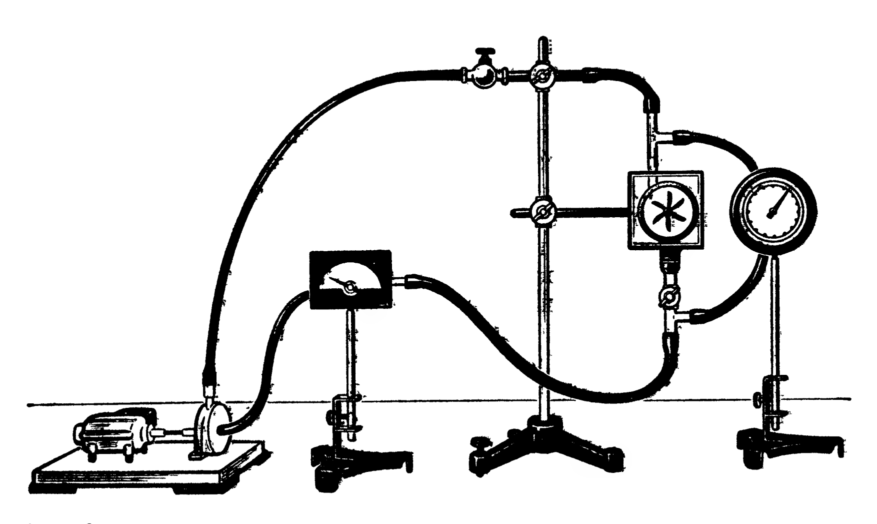


Рис. 9.4

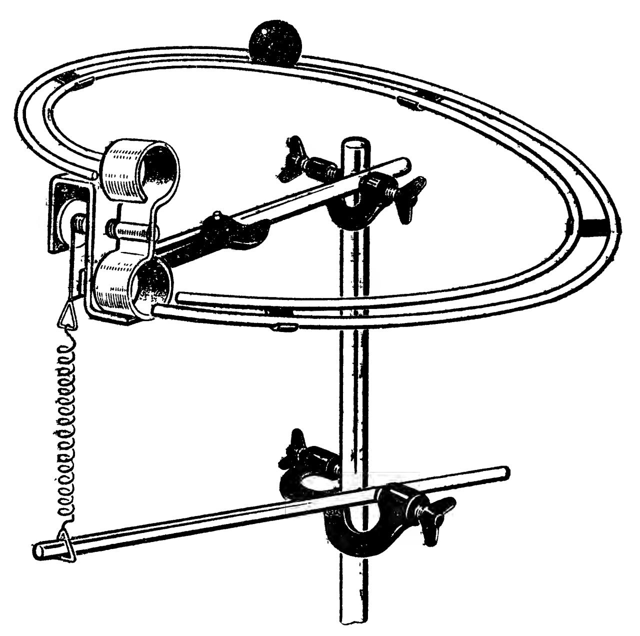


Рис. 9.5

тока» и «скорость носителей тока»? (Есть! Скорость носителей тока незначительная, а скорость распространения тока огромна, т. е. ток практически распространяется мгновенно, точнее, со скоростью распространения поля.)

При рассмотрении последнего вопроса можно привести аналогию с газопроводом или нефтепроводом. В этом случае скорость частиц газа в газопроводе или нефти в нефтепроводе уподобляется скорости носителей заряда в электрической цепи, а «скорость тока» — скорости передачи давления в газопроводе или нефтепроводе.

Для объяснения процессов, происходящих в электрической цепи, полезна механическая модель (рис. 9.5). Скатывание шарика по винтовой наклонной плоскости происходит под действием силы тяжести. Это движение аналогично движению электронов на внешнем участке цепи под действием сил электрического поля. Чтобы поднять шарик, приготовить его для следующего скатывания, необходимо совершить работу против силы тяжести. Эта работа аналогична в случае электрической цепи работе сторонних сил.

Источники тока характеризуются внутренним сопротивлением r и электродвижущей силой $\mathcal{E}$. Электродвижущая сила определяется работой, необходимой для разделения зарядов, или представляет собой отношение работы сторонних сил по перемещению электрического заряда вдоль контура к заряду $\left(\mathcal{E} = \frac{A_{ст}}{q}\right)$.

2. СТАЦИОНАРНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

В случае постоянного тока в проводниках существует электрическое поле, отличное от электростатического поля. Это поле называется *стационарным полем*. Но стационарным полем вообще называют электромагнитное поле постоянного тока, имеющее как электрическую, так и магнитную компоненты.

Стационарное поле постоянно во времени. Если в системе уравнений Максвелла это учесть (производные по времени равны нулю), то система уравнений распадется на две независимые друг от друга части — уравнения для электрического и магнитного полей. Благодаря этому стационарное электрическое поле является потенциальным так же, как и электростатическое. Источниками этого поля являются как бы неподвижные заряды. Эту неподвижность электрических зарядов в случае постоянного тока следует понимать в том смысле, что пространственное распределение зарядов не меняется со временем. Действительно, электрические заряды как бы обмениваются местами, но их концентрация нигде во времени не изменяется.

Стационарное электромагнитное поле имеет свои особенности: одни его свойства отличаются от свойств изученного учащимися электростатического поля, а другие — нет.

Рассмотрим этот вопрос подробно.

Уже было установлено, что без восполнения энергии статическое поле не может постоянно приводить заряды в движение, совершая при этом работу. Также известно, что при протекании тока выделяется тепло. Разность потенциалов на любом участке цепи при постоянном токе остается неизменной. Следовательно, и напряженность электрического поля $\vec{E}$ в проводнике, а значит, и энергия этого поля остаются постоянными. Поле действительно является стационарным, т. е. не изменяющимся со временем. За счет какой же энергии происходит нагревание проводников цепи? Эта энергия доставляется в цепь устройствами, в которых неэлектростатическая энергия преобразуется в энергию электромагнитного поля. Не вдаваясь на первых порах в детали всех процессов преобразования энергии в электрической цепи, можно лишь в общих чертах сказать, что «механизм» такой перекачки при постоянстве поля во времени сводится к тому, что энергия доставляется электромагнитным полем, причем это происходит на каждом участке цепи. Этот вывод, основанный на определении вектора Умова — Пойнтинга (вектора плотности потока энергии, переносимого электромагнитным полем), не может быть изложен школьникам элементарно. Однако тот факт, что электромагнитное поле существует не только внутри проводников, но и вне проводников, можно продемонстрировать с помощью простых опытов [84, опыты 39, 40 и 126]. Факт существования магнитного поля тока вне проводника может быть показан с помощью магнитной стрелки (опыт Эрстеда). Что касается электрического поля вне проводника, то могут быть получены

спектры его линий напряженности (картины этих полей для случаев электростатического и стационарного полей). Опыт ставится с плоской прозрачной кюветой, в которую наливают трансформаторное (или касторовое) масло и насыпают немного манной крупы, кристалликов гипосульфита или очень мелко нарезанного волоса. В кювету погружают электроды (которыми могут служить деревянные пластины); их присоединяют к высоковольтному выпрямителю или электрофорной машине. В проекции на экран наблюдают картину электростатического поля при разомкнутой цепи (рис. 9.6, *а*). Затем деревянные электроды соединяют деревянной пластинкой и наблюдают стационарное электрическое поле (рис. 9.6, *б*). Линии напряженности стационарного поля не перпендикулярны поверхности электродов. Это означает, что при наличии тока существует напряжение между отдельными точками проводника, вследствие чего напряженность поля имеет продольную составляющую. Она-то и создает направленное движение зарядов в проводнике.

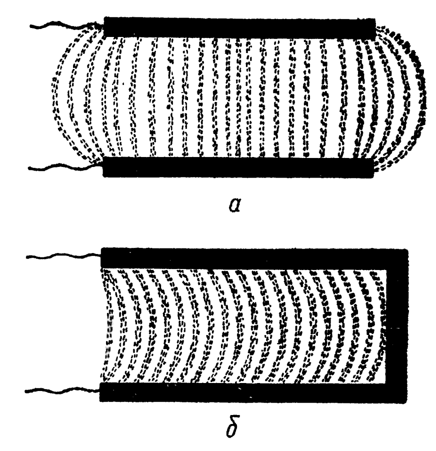


Рис. 9.6

Наличие разности потенциалов между точками проводника является существенным отличием стационарного поля от электростатического. Полезно показать это распределение потенциала вдоль проводника с током. Опыт ставится так. Между двумя изолирующими штативами натягивают веревку (для придания ей проводимости ее нужно слегка смочить; достаточно провести мокрыми пальцами вдоль веревки). Один конец веревки присоединяют к полюсу высоковольтного выпрямителя или электрофорной машины, другой заземляют. Второй полюс выпрямителя также заземляют. Потенциал измеряют электрометром, для чего его корпус заземляют, а к стержню гибким проводником присоединяют металлический шарик на изолирующей ручке. Демонстратор подносит шарик к различным точкам веревки, показывая плавное изменение потенциала вдоль веревки, по которой протекает ток. Если цепь тока разорвать (для чего достаточно отключить заземленный полюс источника напряжения), потенциал проводника во всех точках веревки станет одинаковым.

Из подобных экспериментов устанавливается различие между статическим и стационарным полями. Статическое поле внутри проводника отсутствует, из-за чего на поверхности проводника во всех ее точках устанавливается одинаковый потенциал. Стационарное поле существует и внутри проводника, создавая направлен-

ное движение зарядов проводимости; вследствие этого потенциалы различных точек проводника неодинаковы.

Таким образом, существуют отличия в свойствах статического и стационарного полей. Вместе с тем есть и сходство: стационарное поле (вернее, его электрическая компонента) является, как и статическое поле, потенциальным полем. В стационарном поле работа по перемещению заряда не будет зависеть от формы траектории, как и в случае электростатического поля. Поэтому и применимо к нему понятие потенциала. Потенциальный характер стационарного электрического поля можно обосновать следующим образом. Как показывает опыт, сила постоянного тока во всех сечениях цепи одинакова: заряды нигде не накапливаются и не исчезают. Это означает, что, когда по проводнику течет постоянный ток, распределение зарядов в пространстве не меняется со временем, хотя заряды и находятся в движении: просто одни заряженные частицы занимают места других, а те — третьих и т. д. Постоянный ток подобен безвихревому течению жидкости. Сколько бы снимков мы ни сделали в разные моменты времени, получится один и тот же вид. Но неизменность в пространственном распределении зарядов является признаком потенциальности поля. Таким образом, основное требование к зарядам, при котором их поле может считаться потенциальным, выполняется и при наличии постоянного тока. Это означает, что стационарное поле является потенциальным.

3. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ЗАМКНУТОЙ ЦЕПИ

Знание свойств стационарного поля позволяет глубже понять основной закон электрического постоянного тока — закон Ома. Работа потенциального поля на замкнутом пути (в данном случае — в замкнутой цепи) всегда равна нулю. Этого нельзя, однако, сказать о поле сторонних сил; если бы сторонние силы тоже были потенциальными, то существование постоянного тока было бы невозможным. Работа сторонних сил на замкнутом пути (в замкнутой цепи электрического тока) равна количеству теплоты, выделяемой током в цепи:

$$\mathscr{E} It = I^2 (R + r)t.$$

Отсюда следует закон Ома для замкнутой цепи:

$$I = \frac{\mathscr{E}}{R + r},$$

где $\mathscr{E}$ — ЭДС, I — сила тока, r и R — соответственно сопротивления внутреннего и внешнего участков цепи.

Значит, закон Ома для полной цепи является прямым выражением не только закона сохранения и превращения энергии, но и потенциального характера стационарного электрического поля. Работу совершают во всей цепи только сторонние силы.

Приведем еще один вывод закона Ома для полной цепи. Как известно, работа, совершаемая во всей цепи, равна в соответствии с законом сохранения и превращения энергии сумме работ на внешней и внутренней цепях:

$$A_{\text{полн}} = A_{\text{внш}} + A_{\text{внт}}.$$

Разделив обе части равенства на заряд q, получим:

$$\frac{A_{\text{полн}}}{q} = \frac{A_{\text{внш}}}{q} + \frac{A_{\text{внт}}}{q}.$$

По определению $\mathscr{E} = \frac{A_{\text{полн}}}{q}$. А величину $\frac{A}{q}$ называют напряжением и обозначают U. Тогда

$$\mathscr{E} = U_{\text{внш}} + U_{\text{внт}}.$$

Если же записать

$$U_{\text{внш}} = IR, \text{ а } U_{\text{внт}} = Ir,$$

то $\mathscr{E} = IR + Ir = I(R + r)$, откуда $I = \frac{\mathscr{E}}{R + r}$.

Из других свойств стационарного электрического поля, в какой-то мере используемых при изучении последующих тем, отметим, что поле внутри проводника является однородным. Это следует из закона Ома в дифференциальной форме $\vec{j} = \lambda\vec{E}$, где $\vec{j}$ — вектор плотности тока, λ — удельная проводимость. Так как в цепи нигде не происходит накопления зарядов, значит, линии напряженности поля нигде не сходятся и не расходятся. Это в то же время означает, что в проводнике при протекании постоянного тока нет нигде объемных зарядов. Этот вывод можно объяснить учащимся так. Из опыта мы знаем, что ток в любом месте цепи одинаков: заряды нигде не накапливаются и не исчезают. Учитывая, что заряды движутся преимущественно вдоль линий напряженности, можно ожидать, что эти линии не должны пересекаться (не сходиться и не расходиться). Ибо в случае их пересечения в проводнике должен был бы образоваться заряд (линии поля пересекаются только на зарядах). В цилиндрическом проводнике поле можно считать однородным. Это используется при выводе закона Ома на основе электронных представлений.

4. О ФОРМИРОВАНИИ ПОНЯТИЯ «НАПРЯЖЕНИЕ»

Понятие напряжения весьма трудно усваивается семиклассниками, но у девятиклассников оно затруднений обычно не вызывает. Здесь возможны другого рода трудности, связанные с терминологией. В различной научной и учебной литературе напряжение определяется не идентично. А ведь школьники обращаются не только к школьному учебнику. Поэтому учитель физики, готовясь

к беседе с учащимися, должен согласовать различные подходы к трактовке понятия «напряжение».

В книгах по физике под напряжением чаще всего понимается разность потенциалов. «Физический энциклопедический словарь» так определяет этот термин: «Под н. э. на зажимах источника постоянного тока всегда понимается соответствующая разность потенциалов, т. е. н. э. берется по пути, расположенному вне источника» [30, т. 3, с. 359].

В электротехнической литературе под напряжением понимают иную величину: удельную работу, совершаемую на участке цепи суммарным полем (кулоновским и полем сторонних сил), т. е.

$$U = \frac{A_{\text{кул}}}{q} + \frac{A_{\text{ст}}}{q}.$$

Эта величина оказывается равной произведению силы тока на сопротивление участка R: $U = IR$.

Такое определение нами было уже использовано в предыдущем параграфе.

Чтобы выяснить различие между этими двумя определениями напряжения, необходимо вспомнить, чтó понимается под разностью потенциалов $\varphi_a - \varphi_b$ и чтó — под электродвижущей силой $\mathscr{E}$.

Разность потенциалов $\varphi_a - \varphi_b$ является характеристикой электростатического (кулоновского) поля:

$$\varphi_a - \varphi_b = \frac{A_{\text{кул}}}{q}.$$

Электродвижущая сила является характеристикой созданного источником тока стороннего поля:

$$\mathscr{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}.$$

В школьном учебном пособии напряжение отождествляется с разностью потенциалов ($U = \varphi_a - \varphi_b$) и закон Ома для участка цепи записывается так:

$$I = \frac{\varphi_a - \varphi_b}{R} = \frac{U}{R}.$$

Из закона Ома для полной цепи $I = \frac{\mathscr{E}}{R + r}$ следует, что

$$\mathscr{E} = IR + Ir.$$

Здесь произведения IR и Ir — суть падения напряжения на внутреннем и внешнем участках цепи.

Электродвижущая сила источника тока равна сумме падений напряжений на внешнем и внутреннем участках цепи. При таком подходе напряжение, как и разность потенциалов, является характеристикой кулоновского поля.

Если напряжение вводится по второму способу, то с учетом определений разности потенциалов и ЭДС получаем:

$$U = \frac{A_{\text{кул}}}{q} + \frac{A_{\text{ст}}}{q} = \varphi_a - \varphi_b + \mathscr{E}.$$

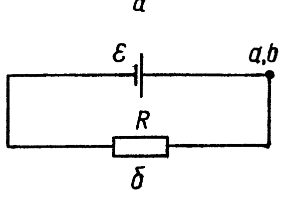


Рис. 9.7

На рисунке 9.7, *а* показан участок цепи *ab* сопротивлением *R*, по которому течет ток *I*. Напряжение на этом участке определяется формулой

$$U_{ab} = IR_{ab} = \varphi_a - \varphi_b + \mathscr{E}.$$

Сразу видно, что в данном случае отождествлять напряжение и разность потенциалов нельзя ($U \neq \varphi_a - \varphi_b$). Здесь напряжение имеет тот же смысл, что и падение напряжения IR в первом случае. Напряжение выступает как характеристика не кулоновского, а суммарного поля (кулоновского и поля сторонних сил).

Однако различная трактовка понятия напряжения играет существенную роль лишь в случае участка цепи, содержащего источник ЭДС. Если же на участке цепи нет источника ЭДС (именно этот случай и рассматривается в основном школьном курсе физики), то и при второй трактовке напряжение тождественно разности потенциалов.

Встречаются иногда задачи, при решении которых приходится применять обобщенный закон Ома:

$$I = \frac{U}{R_{ab}} = \frac{\varphi_a - \varphi_b + \mathscr{E}}{R}.$$

Здесь напряжение трактуется в электротехническом смысле. Надо лишь договориться о знаках $\mathscr{E}$ (или IR). Знаки ЭДС определяются направлением тока и направлением обхода участка цепи. Напряженность поля сторонних сил всегда направлена в сторону, противоположную напряженности электрического поля внутри источника. Поэтому $\mathscr{E}$ берут со знаком «плюс», если на пути от точки *a* к точке *b* приходится идти от «минуса» источника к «плюсу». Если же на пути от *a* к *b* проходят источник от «плюса» к «минусу», $\mathscr{E}$ берут со знаком «минус».

Можно пользоваться и другим правилом. В законе $U = \varphi_a - \varphi_b + \mathscr{E} = IR$ произведение IR берут со знаком «плюс», если направление обхода совпадает с направлением тока. Если же направление обхода и направление тока не совпадают, то произведение IR надо взять со знаком «минус».

Теперь уточним, что показывает вольтметр. Известно, что вольтметр, подключенный к участку цепи, измеряет разность потенциалов на этом участке. В случае первой (физической) трактовки напряжения вольтметр вместе с тем измеряет и напряжение. При электротехническом же толковании понятия напряжения этого утверждать нельзя: вольтметр измеряет именно разность

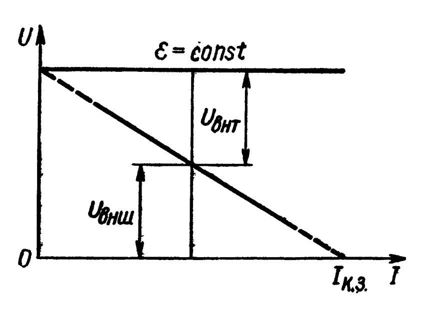


Рис. 9.8

потенциалов $\varphi_a - \varphi_b$, а не напряжение U. Хотя в частном случае, когда на участке цепи отсутствует источник ЭДС и $\varphi_a - \varphi_b = U$, вольтметр и при электротехническом подходе покажет напряжение U. Важно понимать, что вольтметр всегда показывает напряжение на самом себе.

Закон Ома в обобщенном виде $I = \frac{\varphi_a - \varphi_b + \mathscr{E}}{R_{ab}}$, записанный для участка ab цепи, представленной на рисунке 9.7, a, очень легко преобразуется к более простому виду в следующих двух случаях:

1. Замкнутая цепь состоит из источника тока и нагрузки. В этом случае (рис. 9.7, $б$) точки a и b совпадают и $\varphi_a - \varphi_b = 0$. Тогда $I = \frac{\mathscr{E}}{R_{ab}} = \frac{\mathscr{E}}{R + r}$. Это закон Ома для полной цепи.

2. Цепь с источником тока разомкнута и сила тока равна нулю. Тогда $IR = U = \varphi_a - \varphi_b + \mathscr{E} = 0$; следовательно, $\mathscr{E} = \varphi_b - \varphi_a$, т. е. ЭДС равна разности потенциалов на концах разомкнутой цепи.

Если вольтметр обладает достаточно большим сопротивлением и можно пренебречь током в его цепи, то показание такого вольтметра, подключенного к зажимам источника тока (при разомкнутой внешней цепи), можно принять за ЭДС источника.

Нами разобрана сущность понятий $\mathscr{E}$ и $\varphi_a - \varphi_b$. При этом мы шли от этих понятий к закону Ома и к измерению этих величин. Можно применить другую логику — начинать рассматривать материал с вопроса, чтó измеряет вольтметр, т. е. идти от измерений к понятиям $\mathscr{E}$ и $\varphi_a - \varphi_b$.

В заключение отметим, что ток в цепи создается либо суммарным полем — кулоновским и сторонним, либо одним из этих полей, если другое отсутствует. Поэтому неправильно утверждать, что необходимым условием для существования тока является наличие разности потенциалов. Ток может существовать только за счет поля сторонних сил.

Уяснению смысла закона Ома для полной цепи и пониманию различия между ЭДС и напряжением способствует разбор графика зависимости напряжения от силы тока в замкнутой цепи (рис. 9.8).

С учащимися выясняются следующие вопросы:

1) Чему равно напряжение при нулевом токе? (ЭДС.)

2) Чему равна ЭДС в общем случае? ($\mathscr{E} = U_{внш} + U_{внт}$, причем $\mathscr{E} = \text{const}$.)

3) Что понимается под коротким замыканием цепи? (Сила тока максимальна, а $U = 0$.)

4) Что происходит в цепи при увеличении внешнего сопротивления? (I уменьшается, $U_{внш}$ растет, $U_{внт}$ уменьшается, но $U_{внш} + U_{внт} = \mathscr{E} = \text{const}$.)

5. СОЕДИНЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ

Простейшие задачи тренировочного характера, в которых учащиеся применяют формулы общего сопротивления цепи при последовательном соединении ($R_{общ} = R_1 + R_2 + R_3 + \ldots$) и при параллельном соединении $\left(\frac{1}{R_{общ}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \ldots\right)$ проводников, не вызывают у них затруднений. Остановимся сразу на случае смешанного соединения проводников. При решении таких задач полезны следующие приемы:

1) Все точки соединения или разветвления в схемах следует обозначать буквами, а сопротивления участков — буквенными индексами, например R_{AB}, R_{CD} и т. п.

2) Вместо сложных схем соединения целесообразно чертить так называемые эквивалентные схемы, в которых отчетливо видны все точки разветвления и характер соединения отдельных участков цепи.

3) В большинстве случаев расчеты в общем виде для всей цепи производить не следует, а лучше сначала определить сопротивление каждого участка отдельно, а затем — сопротивление всей цепи.

4) Если соединение проводников сложно и начертить простую эквивалентную схему не удается, решать задачу следует на основе законов Кирхгофа, которые полностью в средней школе не изучаются. Такого рода задачи в средней школе могут решаться только в частных случаях, для так называемых симметричных контуров, в которых есть точки с одинаковыми потенциалами. Эти точки можно соединить или разъединить. После этого схема упрощается.

5) Задачи на определение сопротивлений шунтов $R_ш$ к амперметрам и добавочных сопротивлений $R_{доб}$ к вольтметрам вначале следует решать как обычные задачи на параллельное или последовательное соединение проводников. В результате этого выводятся формулы $R_ш = \frac{R_а}{n-1}$ и $R_{доб} = R_в(n-1)$, где $R_а$ и $R_в$ — соответственно сопротивления амперметра и вольтметра, а n — число, показывающее, во сколько раз расширены пределы измерения этих приборов. После этого подобные задачи могут решаться по готовым формулам.

6) При решении задач на мостик Уитстона можно применять предварительно выведенную формулу $R = R_{эт}\frac{l_1}{l_2}$, где $R_{эт}$ — известное сопротивление резистора, включенного в одно из плеч моста, а l_1 и l_2 — длины плеч реохорда.

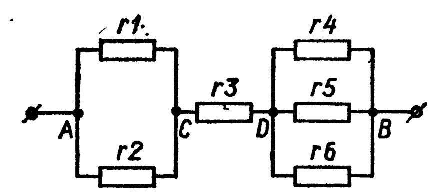


Рис. 9.9

Для иллюстрации сказанного приведем несколько примеров решения задач.

Задача 1. Найти распределение токов и напряжений в цепи (рис. 9.9), если напряжение $U = 48$ В, $r_1 = r_2 = 3$ Ом, $r_2 = 6$ Ом, $r_4 = 5$ Ом, $r_5 = 10$ Ом и $r_6 = 3$ Ом. [29, № 633.]

Решение. Точки разветвления в цепи обозначим буквами A, B, C и D. Участки AC, CD и DB соединены последовательно, так что $R_{AB} = R_{AC} + R_{CD} + R_{DB}$. На участках AC и DB резисторы соединены параллельно. Вычисляем:

$$R_{AC} = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} = 2 \text{ Ом}; \quad R_{CD} = 3 \text{ Ом};$$

$$\frac{1}{R_{DB}} = \frac{1}{r_4} + \frac{1}{r_5} + \frac{1}{r_6},$$

откуда $R_{DB} = 1{,}6$ Ом.

Окончательно имеем:

$$R_{AB} = 6{,}6 \text{ Ом, а } I_0 = \frac{U}{R_{AB}} = \frac{48 \text{ В}}{6{,}6 \text{ Ом}} = 7{,}2 \text{ А}.$$

Ток I_0 проходит через резистор сопротивлением r_3. $I_3 = I_0 = 7{,}2$ А. Ток в других резисторах определяем по закону Ома для участка цепи, предварительно определив U_{AC} и U_{DB}.

$$U_{AC} = I_0 R_{AC}; \quad I_1 = \frac{U_{AC}}{r_1} \text{ и } I_2 = \frac{U_{AC}}{r_2};$$

$$U_{DB} = I_0 R_{DB}; \quad I_4 = \frac{U_{DB}}{r_4}; \quad I_5 = \frac{U_{DB}}{r_5}; \quad I_6 = \frac{U_{DB}}{r_6}.$$

Расчеты дают:

$$U_{AC} = 14{,}4 \text{ В}; \quad U_{CD} = 21{,}6 \text{ В};$$
$$U_{DB} = 11{,}5 \text{ В}; \quad I_1 = 4{,}8 \text{ А}, \quad I_2 = 2{,}4 \text{А};$$
$$I_3 = 7{,}2 \text{ А}; \quad I_4 = 2{,}3 \text{ А}; \quad I_5 = 1{,}2 \text{ А};$$
$$I_6 = 3{,}8 \text{ А}.$$

Задача 2. Определить общее сопротивление показанного на рисунке 9.10 соединения.

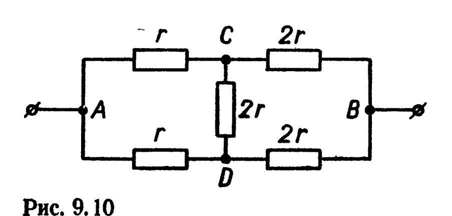


Рис. 9.10

Решение. Это как раз случай симметричных контуров, в которых есть точки одинаковых потенциалов. На рисунке 9.10 одинаковые потенциалы имеют точки C и D, которые надо разъединить и выбросить резистор сопротивлением $R_{CD} =$

$= 2r$, в котором тока нет. Получаем более простую схему (рис. 9.11). Сопротивление этой цепи $R_{AB} = \frac{3}{2}r$.

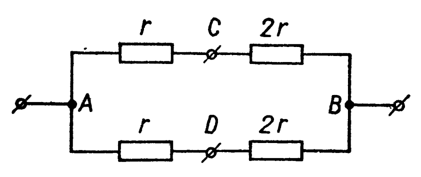


Рис. 9.11

Задача 3. Эталонный резистор в одном из плеч измерительного моста (рис. 9.12) имеет сопротивление $R = 20$ Ом. Отношение плеч реохорда $l_1 : l_2$ для показания гальванометра, равного нулю, составляет 2 : 3. Определить сопротивление r резистора, включенного в другое плечо моста. [29, № 637.]

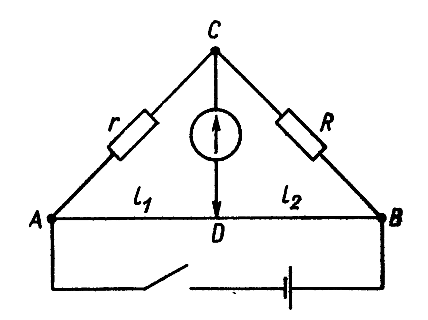


Рис. 9.12

Решение. Составляем эквивалентную схему (рис. 9.13). Получаем:

$$r = \frac{Rl_1}{l_2} = 13 \text{ Ом}.$$

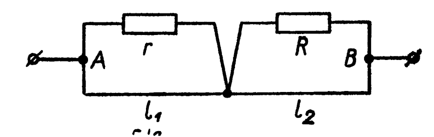


Рис. 9.13

6. О РЕШЕНИИ ТИПОВЫХ ЗАДАЧ НА ЗАКОН ОМА

Рассмотрим решение следующих типовых задач.

Задача 1. Найти токи и напряжения на участках внешней цепи (рис. 9.14), если каждый из трех элементов имеет ЭДС $\mathcal{E}_{эл} = 1,5$ В и внутреннее сопротивление $r_{эл} = 0,5$ Ом. Во внешней цепи включены резисторы сопротивлениями $R_1 = 0,73$ Ом, $R_2 = 4$ Ом, $R_3 = 0,8$ Ом и $R_4 = 1,58$ Ом. [29, № 643.]

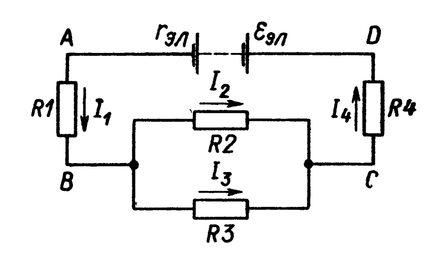


Рис. 9.14

Решение. По закону Ома для полной цепи $I_{общ} = \frac{\mathcal{E}_{бат}}{R_{общ} + r_{бат}}$.

$R_{общ} = R_{AD} = R_{AB} + R_{BC} + R_{CD}$. На участке BC резисторы соединены параллельно, поэтому $R_{BC} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}$; $R_{BC} = 0,67$ Ом.

$R_{общ} = 0,73$ Ом $+ 0,67$ Ом $+ 1,58$ Ом $= 2,98$ Ом ≈ 3 Ом. $\mathcal{E}_{бат} = n\mathcal{E}_{эл}$, где n — число соединенных элементов, аналогично $r_{бат} = nr_{эл}$.

Расчеты дают: $\mathcal{E}_{бат} = 4,5$ В, $r_{бат} = 1,5$ Ом.

Следовательно, $I_{общ} = \frac{4,5 \text{ В}}{3 \text{ Ом} + 1,5 \text{ Ом}} = 1$ А.

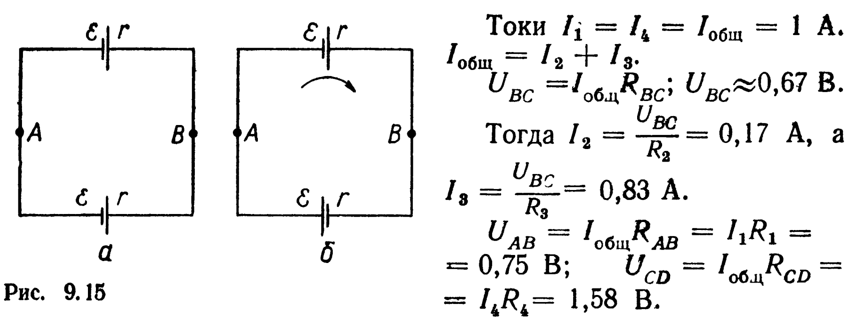


Рис. 9.15

Токи $I_1 = I_4 = I_{общ} = 1$ А. $I_{общ} = I_2 + I_3$.

$U_{BC} = I_{общ}R_{BC}$; $U_{BC} \approx 0{,}67$ В.

Тогда $I_2 = \frac{U_{BC}}{R_2} = 0{,}17$ А, а $I_3 = \frac{U_{BC}}{R_3} = 0{,}83$ А.

$U_{AB} = I_{общ}R_{AB} = I_1R_1 = 0{,}75$ В; $U_{CD} = I_{общ}R_{CD} = I_4R_4 = 1{,}58$ В.

Задача 2. Два одинаковых элемента соединены так, как показано на рисунке 9.15, *а*, *б*. Определить напряжение между точками *A* и *B*. [29, № 646.]

Решение. В первом случае (рис. 9.15, *а*) элементы соединены между собой параллельно и во внешней цепи тока нет, нет его и в цепи элементов, следовательно $U_{AB} = \mathcal{E}$.

Во втором случае (рис. 9.15, *б*) элементы соединены последовательно, и в цепи, состоящей из этих элементов, идет ток $I = \frac{2\mathcal{E}}{2r} = \frac{\mathcal{E}}{r}$. По закону Ома для участка цепи, содержащей ЭДС, напряжение $U_{AB} = \mathcal{E} - Ir$. Получаем неожиданный результат:

$$U_{AB} = \mathcal{E} - \frac{\mathcal{E}}{r} r = 0.$$

Падение напряжения, созданное одним элементом внутри другого, компенсируется его электродвижущей силой.

Прохождение электрического тока через различные среды

Последовательно рассмотрим изучение материала об электрическом токе в металлах, электролитах, газах, в вакууме и в полупроводниках.

Общий подход к рассмотрению всех подтем одинаков: выясняем, какой носитель электрического заряда имеет место в данном виде проводника, а затем применяем общие условия существования тока в цепи. В определенном плане такой подход можно назвать дедуктивным, так как мы идем от общих условий существования тока к конкретным, частным случаям тока в конкретном виде проводника.

7. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В МЕТАЛЛАХ

Этот материал можно спланировать следующим образом:

1-й урок. Доказательства электронной проводимости металлов. Опыты Рикке, Мандельштама — Папалекси или Толмена — Стюарта. Основы элементарной электронной теории.

2-й урок. Вывод закона Ома для участка цепи на основе элементарной электронной теории.

3-й урок. Обсуждение различных следствий из полученных зависимостей при выводе закона Ома для участка цепи. Решение задач.

Электронная проводимость металлов. В основе электронной теории лежат опыты Милликена, представление об электроне как элементарной частице — носителе электрического заряда, опыты Рикке, Мандельштама — Папалекси и Толмена — Стюарта. Целесообразно вначале рассмотреть модели электрона, которые возникали последовательно в науке по мере изучения свойств электрона, открытого Дж. Дж. Томсоном в 1897 г.

Первую модель электрона предложил в 1902 г. М. Абрагам. Он представил электрон в виде шарика, равномерно заряженного по объему. Именно так представляют себе электрон большинство современных школьников. Вторая (механическая) модель электрона в виде вращающегося заряженного шарика была предложена в 1926 г. Уленбеком и Гаудсмитом. Понятно, что эта модель не более правомерна, чем первая. В действительности же электрон — не однородный шарик и не материальная точка. Он, по-видимому, обладает какой-то структурой, которая еще не вскрыта. Известно, что электрон в основном характеризуется зарядом e, массой m и спином s. Движение электрона подчиняется законам квантовой механики.

Однако при изучении электронной теории в средней школе все же возможно вначале говорить об электроне как о шарике. Важно только, чтобы в дальнейшем представление учащихся об электроне постепенно обогащалось и развивалось.

Весьма важную роль в школьном курсе физики играет представление о дискретности электрического заряда, об элементарном электрическом заряде. С этой целью еще в VII классе рассматривается опыт Иоффе — Милликена. Но в IX классе сущность этого опыта целесообразно повторить. Идея опыта состоит в том, что в электрическое поле между заряженными пластинами конденсатора попадает какое-нибудь тело малых размеров. За ним наблюдают в микроскоп. Если это тело не имеет заряда, то под действием силы тяжести оно будет падать вниз. Если же тело заряжено, то подбором напряжения на обкладках конденсатора можно добиться, чтобы сила $\vec{F}$, с которой на заряженное тело действует электрическое поле, уравновешивала силу тяжести $m\vec{g}$ (рис. 9.16).

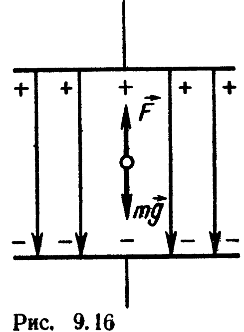
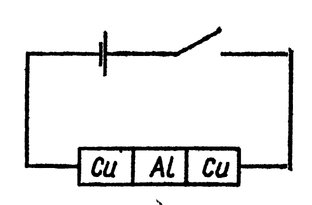


Рис. 9.16

Желательно предложить учащимся задачу на определение напряженности электрического поля, которое необходимо создать, чтобы уравновесить капельку масла массой 10^{-15} кг, если заряд капельки $1{,}6 \cdot 10^{-18}$ Кл. Решение этой задачи даст возможность пояснить опыт Иоффе — Милликена, а также



выяснить ряд дополнительных вопросов, в частности в чем отличие опытов Иоффе и Милликена. В опытах Иоффе заряженные частицы представляли собой металлические пылинки, а в опытах Милликена—капельки масла; опыт Иоффе лишь подтвердил дискретность электрического заряда, а в опытах Милликена было определено значение элементарного электрического заряда — заряда электрона.

Электронная проводимость металлов была доказана следующими фундаментальными опытами:

1) опытом Рикке, показывающим, что электропроводимость металлических проводников обусловлена наличием и перемещением в них каких-то «носителей заряда», которые являются общими для всех металлов (независимо от их физических и химических свойств);

2) опытом Мандельштама и Папалекси (1913 г.), доказывающим возможность инерционного движения в металлах «носителей электронных зарядов»;

3) опытом Стюарта и Толмена (1916 г.) по определению знака и удельного заряда «носителей заряда» в металлических проводниках.

При объяснении в средней школе опыта Рикке достаточно описать сущность опыта по схеме (рис. 9.17). Через медные и алюминиевый цилиндры электрический ток пропускали длительное время (более года). За это время прошел огромный заряд (порядка 10^6 Кл). Но никаких следов переноса вещества не наблюдалось.

Что касается опытов Мандельштама — Папалекси и Толмена — Стюарта, то в основе этих опытов лежит одна и та же идея — регистрация инерционного движения электронов. Только в первом опыте регистрация эффекта осуществлялась с помощью телефона, а во втором индикатором тока служил гальванометр. Поэтому в школе достаточно рассмотреть один из опытов, например опыт Толмена — Стюарта. Об опыте Мандельштама и Папалекси, первый вариант которого был осуществлен еще в 1913 г., можно рассказать учащимся очень кратко.

В опыте Стюарта и Толмена быстро вращалась вокруг вертикальной оси катушка с достаточным числом витков медного провода. Концы провода присоединялись к кольцам, по которым скользили щетки, соединенные с гальванометром. При внезапной остановке катушки гальванометр показывал ток, возникновение которого связано с тем, что вращающиеся с катушкой свободные носители электрических зарядов в случае остановки катушки по инерции продолжают движение относительно кристаллической решетки проводника. Отношение заряда к массе этих носителей зарядов $\left(\frac{q}{m}\right)$ оказалось равным определенному ранее отношению $\frac{e}{m}$ для электрона. Это экспериментально подтверждает, что электрический ток в металлах осуществляется движением электронов.

Для объяснения идеи опыта очень полезна механическая модель инерционного движения электронов (рис. 9.18). Целесообразно также показать кинокольцовку «Опыт Толмена и Стюарта».

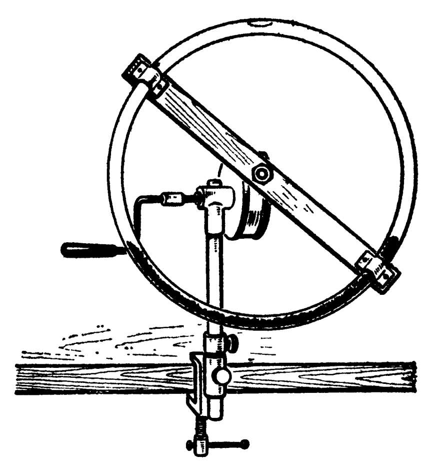


Рис. 9.18

Классическая электронная теория и применение ее для вывода закона Ома для участка электрической цепи. Основные законы постоянного тока (закон Ома и закон Джоуля — Ленца) вводятся в VII классе опытным путем [84, с. 114—116, 141, 142]. При этом объяснение процессов в электрической цепи основывается на модельных представлениях. Соответствующие экранные пособия позволяют представить в динамике модели проводника и электрического тока в нем.

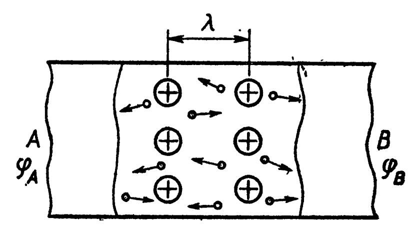


Рис. 9.19

В IX классе для учащихся уже доступно объяснение законов постоянного тока на основе электронных представлений, так как к этому времени они знают законы классической механики, знакомы с характеристиками электрического поля и убеждены в электронной природе проводимости металлов. Заметим, что в средней школе можно рассматривать лишь классическую электронную теорию Друде.

Покажем, как можно вывести закон Ома из положений классической электронной теории.

Участок AB цепи схематически представлен на рисунке 9.19. По классическим представлениям в металле есть ионная решетка и свободный «электронный газ». Электроны движутся хаотически, причем скорость их движения зависит от температуры. Ионы в узлах кристаллической решетки колеблются относительно своих положений равновесия.

В процессе хаотического движения электроны сталкиваются с ионами. Расстояние, которое проходит электрон от одного столкновения до другого, называется длиной свободного пробега (обозначается λ), а время от одного столкновения с ионом до другого называется временем свободного движения (обозначается τ). Расстояния, проходимые электронами между столкновениями, неодинаковы, так что под λ понимается среднее значение длины свободного пробега. То же можно сказать и о τ.

При хаотическом движении электронного газа перемещения заряда в проводнике в среднем нет. Но если на концах проводника A и B имеется разность потенциалов $\varphi_A - \varphi_B$, а внутри проводника — электрическое поле, напряженность которого $E = \frac{\varphi_A - \varphi_B}{L} = \frac{U}{L}$ (где L — длина проводника, а U — напряжение на участке AB), то возникает поступательное перемещение электронов, получившее название «дрейф электронов».

Сила тока I в цепи может быть выражена через заряд электрона e, концентрацию электронов n, среднюю скорость дрейфа электронов $v_{др}$ и площадь сечения проводника S:

$$I = env_{др}S.$$

Средняя скорость дрейфа электронов может быть найдена так. Поле действует на электроны с силой $|\vec{F}| = e\,|\vec{E}| = e\frac{U}{L}$ и сообщает им ускорение $|\vec{a}| = \frac{|\vec{F}|}{m} = \frac{eU}{mL}$, где m — масса электрона. Поэтому для средней скорости дрейфа получаем:

$$v_{др} = \frac{|\vec{a}|\,\tau}{2} = \frac{eU}{2mL}\tau.$$

Учащиеся должны четко понимать различие между скоростью теплового хаотического движения $v_{тепл}$ и скоростью поступательного движения $v_{пост}$. Как легко показать, $v_{тепл} \gg v_{пост}$.

Если длина свободного пробега λ, то время между двумя последовательными столкновениями электрона с ионами равно

$$\tau = \frac{\lambda}{v_{тепл}}.$$

Тогда

$$v_{др} = \frac{eU\tau}{2Lm} = \frac{eU\lambda}{2Lmv_{тепл}}.$$

Подставляя это выражение в найденную нами формулу для силы тока I, получаем: $I = env_{др}S = \frac{ne^2U\lambda S}{2Lmv_{тепл}}$.

Это выражение можно переписать в следующем виде:

$$I = \frac{U}{\frac{2mv_{тепл}}{e^2n\lambda}\cdot\frac{L}{S}}.$$

Знаменатель данной дроби зависит от размеров проводника L и S и характеризующих данное вещество величин n и λ. Величины же e и m (заряд и масса электрона) постоянные. Величина $v_{тепл}$

зависит от температуры, но при фиксированной температуре она также постоянна.

Постоянную для данного проводника величину $\frac{2mv_{\text{тепл}}}{e^2n\lambda} \cdot \frac{L}{S}$ можно назвать электрическим сопротивлением и обозначить через R. Тогда $I = \frac{U}{R}$. Это и есть закон Ома.

Выражение $R = \frac{2mv_{\text{тепл}}}{e^2n\lambda} \cdot \frac{L}{S}$ можно далее привести к виду $R = \rho\frac{L}{S}$, если ввести понятие удельного сопротивления

$$\rho = \frac{2mv_{\text{тепл}}}{e^2n\lambda}.$$

Из выражения для ρ видно, что удельное сопротивление зависит от температуры через $v_{\text{тепл}}$. Но учащиеся уже знают, что $v_{\text{тепл}} \sim \sim \sqrt{T}$.

Опыт же показывает другую зависимость ρ от T: $\rho \sim T$. Это противоречие обусловлено ограниченностью классической электронной теории. Зависимость ρ от T может быть правильно объяснена только на основе квантовой механики.

Взяв известные значения ρ, m, e, $v_{\text{тепл}}$ и n, можно рассчитать λ. Такие расчеты дают для λ значение, которое значительно больше действительных расстояний между ионами кристаллической решетки. Это также говорит о несовершенстве классической электронной теории, которая является лишь первым приближением в процессе познания механизма электропроводимости.

Для того чтобы учащиеся представляли хотя бы порядок величин, входящих в рассмотренные при выводе закона Ома выражения, полезно решение следующей задачи:

В проводнике площадью поперечного сечения 0,5 см² сила тока равна 3 А. Какова скорость дрейфа электронов под действием электрического поля в проводнике, если в каждом кубическом сантиметре металла содержится $4 \cdot 10^{22}$ свободных электронов?

Решение. Если $I = env_{\text{др}}S$, то $v_{\text{др}} = \frac{I}{enS}$. Подставляя значения $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл, $n = 4 \cdot 10^{28}$ м$^{-3}$, $S = 0{,}5 \cdot 10^{-4}$ м^2, получаем: $v_{\text{др}} \approx 9 \cdot 10^{-5}$ м/с.

На основе классической электронной теории можно вывести и закон Джоуля — Ленца. Для этого надо рассчитать всю энергию, которую передают электроны металлу в единицу времени. Учащиеся (особенно сильные) могут выполнить этот расчет самостоятельно.

8. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ЭЛЕКТРОЛИТАХ

Программный материал здесь можно спланировать так:

1-й урок. Законы электролиза. Определение заряда электрона из законов электролиза.

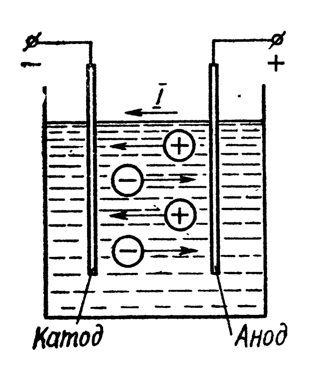


Рис. 9.20

2-й урок. Применение электролиза в технике. Решение задач на законы электролиза.

3-й урок. Лабораторная работа «Определение электрохимического эквивалента меди».

Носители электрического заряда в жидкостях. Далеко не все жидкости электропроводны. Легко показать [84, опыт 80, с. 169], что дистиллированная вода не проводит ток. Обладают электропроводимостью водные растворы или расплавы электролитов (кислот, оснований и солей). Носителями электрических зарядов в них являются положительные и отрицательные ионы. Электрический ток в электролитах—упорядоченное движение этих ионов в электрическом поле, созданном между электродами, опущенными в электролит (рис. 9.20). Положительно заряженный электрод называется анодом, а отрицательно заряженный — катодом.

Ионы, подходя к электродам, отдают или получают электроны, так что на электродах выделяются нейтральные частицы. Это выделение вещества получило название *электролиза*. Водород и металлы всегда выделяются на катоде, а остальные продукты электролиза — на аноде.

Часто учащиеся неправильно думают, что ионы в электролите возникают под действием электрического поля, существующего между анодом и катодом. Поэтому необходимо подчеркнуть, что ионы в электролитах существуют всегда благодаря диссоциации.

Молекулы электролитов полярны и представляют собой диполи. В растворе связи между частью ионов в диполях разрываются и в итоге в электролите появляются ионы. Степень диссоциации зависит от многих факторов и в первую очередь от свойств растворителя и температуры. Хорошо диссоциируют водные растворы солей, кислот и оснований.

При увеличении температуры диссоциация усиливается, так как становится более интенсивным тепловое движение частиц и более вероятны разрывы связей между ними.

Следует также обратить внимание на то, что наряду с процессом диссоциации в электролите происходит процесс молизации — образования молекул из ионов. Если условия не изменяются, между этими процессами (диссоциации и молизации) устанавливается динамическое равновесие. Но важно подчеркнуть, что в растворе всегда есть ионы и необходимо только электрическое поле, чтобы возник электрический ток.

Электролиз лучше всего продемонстрировать с раствором медного купороса, можно показать даже движение ионов в электрическом поле [84, опыт 82, с. 170—161].

Законы электролиза. С законами электролиза учащиеся знакомятся в курсе химии. Поэтому их не надо изучать как нечто новое, достаточно их повторить.

Первый закон говорит о том, что масса выделившегося вещества при электролизе пропорциональна количеству электричества, перенесенному через электролит, т. е.

$$m = kq = kIt,$$

где k — электрохимический эквивалент вещества.

Второй закон электролиза устанавливает связь между электрохимическим эквивалентом k и химическим эквивалентом вещества x. Опыт показывает, что $\frac{x}{k} = \text{const}$.

Важно показать учащимся значение законов электролиза в установлении дискретности заряда (определение заряда одновалентного иона).

Так как девятиклассники уже имеют достаточные представления об электронной теории, желательно (и современно) законы электролиза выводить следующим образом.

Масса вещества m, выделившегося при электролизе, зависит от числа ионов N, которые подходили к электроду, т. е. $m = m_a N$, где m_a — масса атома (в килограммах). Но $m_a = \frac{M}{N_A}$, где M — молярная масса вещества, а N_A — число Авогадро.

Число ионов N, которые подходили к данному электроду, определяется через прошедший заряд q. Каждый ион несет заряд e (заряд электрона) или при валентности n заряд ne.

Тогда $q = neN$, откуда $N = \frac{q}{ne}$. Окончательно получаем: $m = \frac{M}{N_A ne} q$, т. е. обобщенный закон электролиза. Здесь $\frac{M}{N_A ne} = \text{const} = k$ (электрохимический эквивалент вещества), а $q = It$, т. е. в итоге можно записать: $m = kIt$.

Как видно из этого вывода, предлагаемый подход к изучению законов электролиза позволяет обойтись без понятия химического эквивалента x.

Далее с учащимися выясняются следующие вопросы:

1) Физический смысл электрохимического эквивалента вещества (численно равен массе вещества, выделенной при прохождении 1 Кл электричества).

2) Физический смысл числа Фарадея $F = 9{,}65 \cdot 10^4$ Кл/моль (численно равен количеству электричества, которое должно пройти через раствор электролита, чтобы на электроде выделился 1 моль вещества).

3) Определение заряда одновалентного иона ($e = \frac{F}{N_A} = 1{,}6 \times 10^{-19}$ Кл).

4) Технические применения электролиза [см.: 64].

Целесообразен также показ учебного кинофильма «Электролиз и его применение в технике».

9. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ГАЗАХ

Почти весь этот материал дается в ознакомительном плане. Исключение составляет только вопрос о несамостоятельном и самостоятельном разрядах.

Предлагаем следующее примерное планирование:

1-й урок. Несамостоятельный и самостоятельный разряды. Зависимость силы тока в газовом промежутке от приложенного напряжения.

2-й урок. Типы самостоятельного разряда при атмосферном давлении (коронный, дуговой и искровой).

3-й урок. Электрический разряд в газах при пониженном давлении. Различные технические использования газового разряда.

4-й урок. Понятие о плазме. Обобщающее повторение.

Несамостоятельный и самостоятельный разряды в газах. Учащиеся из жизненного опыта знают, что газы в обычном состоянии не электропроводны. Если было бы не так, то как бы тогда действовали выключатели в электрической цепи?

Но при определенных условиях газы становятся электропроводными, носителями электрического заряда в них являются электроны и положительные ионы. Следует обратить внимание учащихся на отличие газов от электролитов, где носителями заряда являются положительные и отрицательные ионы. В электропроводимости газов некоторую роль играют и отрицательные ионы, но основными носителями заряда все же служат электроны и положительные ионы, которые получаются в результате воздействия на газ так называемых внешних ионизаторов (γ-лучей, рентгеновых лучей, ультрафиолетовых излучений, пламени). Процесс отрыва от нейтральных молекул электронов под действием этих факторов носит название *ионизации*. В газе идет и обратный процесс — процесс *рекомбинации*, в результате которого положительные ионы и электроны объединяются в нейтральные молекулы.

Между этими процессами (ионизации и рекомбинации) в газе устанавливается состояние динамического равновесия, т. е. в зависимости от интенсивности внешнего ионизатора в каждой единице объема имеется n электронов и ионов. Если этот ионизованный газ попадет в электрическое поле, то возникнет электрический ток, так как ионы и электроны будут двигаться в противоположных направлениях.

Представим себе камеру, в которой газ ионизуется и к контактам которой подводится регулируемое напряжение (рис. 9.21). Будем наблюдать, как изменяется сила тока I в камере от приложенного напряжения U. График этой зависимости представлен на

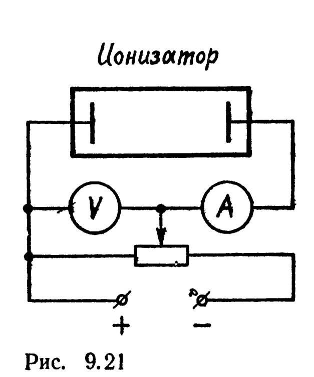


Рис. 9.21

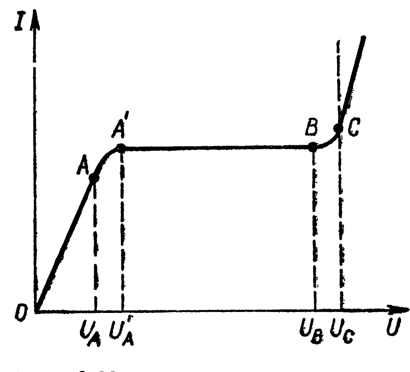


Рис. 9.22

рисунке 9.22. Через точку C мы провели вертикальную пунктирную прямую, которая разделяет график на две части. Все, что слева от этой прямой, относится к несамостоятельному разряду, т. е. разряду, существующему только под действием внешнего ионизатора. Все, что справа,— к самостоятельному разряду, для его существования нет необходимости во внешнем ионизаторе.

С учащимися подробно разбирают участок графика для самостоятельного разряда, участок OA, где имеет место линейная зависимость между I и U, участок $A'B$, соответствующий так называемому току насыщения, а также участок BC, для которого характерны переходные процессы от несамостоятельного к самостоятельному разряду.

Самостоятельный разряд в газе возникает тогда, когда напряженность электрического поля столь велика, что поле в состоянии так разогнать электроны, что их энергия $\frac{mv^2}{2}$ становится достаточной для ионизации газа. Возникает так называемая ионизация ударом (электроном). Этот процесс развивается лавинообразно, так как все новые и новые электроны производят ионизацию. Но эта лавина, возникнув, может исчезнуть, если для ее поддержания не будут возникать все новые электроны — родоначальники этих лавин. Они же возникают в результате бомбардировки катода положительными ионами. При напряжении, равном U_B, начинают возникать электронные лавины, но еще ионы не выбивают электроны из катода. При напряжении, равном U_C, положительные ионы создают эмиссию электронов из катода и начинается действительно самостоятельный разряд в газах.

С учащимися желательно разобрать следующие вопросы:

1. Внешнего ионизатора нет, но сразу к электродам камеры приложено напряжение U, которое меньше U_C и больше U_B, т. е. $U_B < U < U_C$. Возникнут ли лавина и самостоятельный разряд? (Лавина возникнет, так как для ее появления нужен хотя бы один

электрон, а он обязательно будет в газе в результате действия космических лучей. Самостоятельного разряда не будет, так как ток будет кратковременным.)

2. Что произойдет, если к газовому промежутку приложить напряжение $U > U_C$? (Возникнет самостоятельный разряд. Для этого в газовом промежутке достаточно быть хотя бы одному свободному электрону!)

Самостоятельный разряд при атмосферном давлении. Существует несколько видов самостоятельного разряда при атмосферном давлении: а) коронный разряд, б) искровой разряд, в) дуговой разряд.

Все виды разрядов демонстрируют, выясняют условия, при которых они возникают, их проявление в природе и применение в технике.

Коронный разряд [84, опыт 91] возникает в сильно неоднородных электрических полях, около проводов линий передач высокого напряжения, у заостренных частей проводов и т. п. Этот вид разряда приводит к значительным потерям энергии, что нежелательно. В технике коронный разряд применяют в электрофильтрах для очистки промышленных газов. Действие электрофильтра легко показать [84, опыт 92].

Искровой разряд возникает между проводниками при очень большой напряженности электрического поля ($\approx 10^6$ В/м). В природе искровой разряд — хорошо известная учащимся молния.

В технике этот вид разряда применяют для обработки металлов [84, опыт 94]. При искровом разряде огромны напряжение U и сила тока I, а заряд q, протекающий через канал молнии, не столь велик. Дело в том, что этот разряд кратковременный ($t \approx 10^{-6}$ с).

Дуговой разряд возникает при низком напряжении между электродами, которые вначале должны быть приведены в соприкосновение, накалиться, а потом разведены [84, опыт 95]. При дуговом разряде температура в кратере (углублении в одном из электродов) очень высокая (≈ 4000 °С). Этот вид разряда широко применяется в технике (сварка металлов, источник света, источник теплоты и т. п.).

Электрический разряд в газах при пониженном давлении. Все стадии разряда в газах при давлении, меньшем атмосферного, можно показать на специальной установке (рис. 9.23).

Когда постепенно с помощью насоса Камовского создают в трубке все большее и большее разрежение, то наблюдают разряд вначале в виде тонких светящихся нитей, потом в виде шнура, а затем светящийся газ заполняет всю трубку.

Необходимо в этом разряде, носящем название тлеющего, выделить определенные части: темное катодное пространство, положительный анодный столб.

Учащимся желательно объяснить, каким образом при разрежении газа облегчается его ионизация: она происходит при меньшей напряженности поля, чем при атмосферном давлении (растет дли-

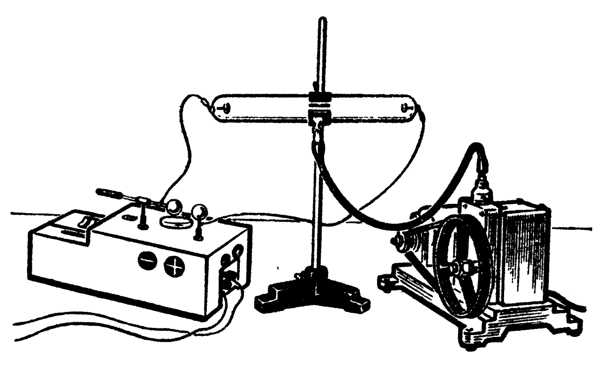


Рис. 9.23

на свободного пробега электронов, т. е. то расстояние, на котором электроны накапливают необходимую для ионизации энергию). Тлеющий разряд находит применение в неоновых лампах и газосветных трубках [84, опыт 99].

Полезно на внеклассных занятиях рассмотреть с учащимися устройство и принцип действия люминесцентной лампы [84, опыт 103].

Плазма. Плазмой называется особое состояние вещества. Это ионизованный газ, который в целом электрически нейтрален.

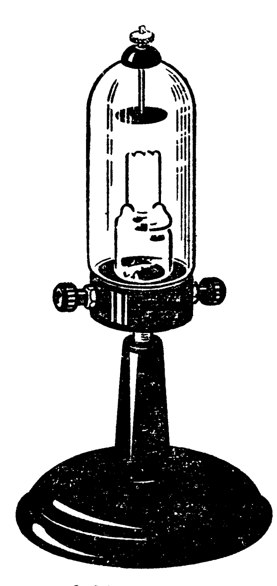
Изучая тлеющий газовый разряд при пониженном давлении, учащиеся впервые встречаются с так называемой холодной плазмой, выясняют, как она получается. Им надо объяснить, что в состояние ионизации газ можно привести также путем нагревания. Так, например, при температурах выше 160 000 К водород полностью ионизуется и получается плазма. Плазма же в недрах Солнца и других звезд имеет температуру в десятки и сотни миллионов градусов. Это так называемая высокотемпературная плазма.

После введения первых и основных представлений о плазме учащимся целесообразно показать учебный кинофильм «Плазма — четвертое состояние вещества» [84, с. 194].

10. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ВАКУУМЕ

Движение свободных электрических зарядов в вакууме под действием сил электростатического поля является более простым случаем, чем движение электронов в металлическом проводнике. Всем предшествующим изучением материала учащиеся подготовлены к восприятию данного материала, и учителю необходимо максимально использовать эти знания, управлять познавательной деятельностью учащихся, а не сообщать им в информативном виде новый материал.

Предлагаем следующее примерное изложение учебного материала об электрическом токе в вакууме:


Рис. 9.24

1-й урок. Явление термоэлектронной эмиссии. Двухэлектродная лампа.

2-й урок. Вольт-амперная характеристика диода. Применения диодов.

3-й урок. Электронные пучки, их свойства и поведение в электростатическом поле.

4-й урок. Электроннолучевая трубка и ее применение в электронном осциллографе.

Явление термоэлектронной эмиссии. Данное явление показывают с помощью демонстрационного диода (рис. 9.24), либо с обычными электронными лампами.

На рисунке 9.25 приведена установка для такого опыта. Электрометр заряжают положительно (палочкой из оргстекла, потертой о мех). При включении цепи накала электронной лампы наблюдается разряд электрометра. Если электрометр зарядить отрицательно, то он разряжаться не будет.

Учащимся следует предложить самим объяснить наблюдаемый эффект, это им посильно. В ходе беседы с учащимися выясняется, что разряд электрометра возможен лишь в том случае, когда в лампе образовался от катода поток отрицательно заряженных частиц. Сообщаем, что это поток электронов. Температура нити накала увеличивается, энергия электронов возрастает и часть электронов может покинуть металл, образуя вокруг него «облако» электронов. Здесь уместна аналогия с хорошо известным учащимся явлением — испарением жидкости.

Механизм термоэлектронной эмиссии целесообразно проиллюстрировать с помощью кинофрагмента «Термоэлектронная эмиссия», где объяснение дается методом мультипликации.

Уместно выяснить с учащимися, является ли нагревание проводника (катода) электрическим током единственно возможным способом обеспечения эмиссии. Учащиеся должны ответить, что эмиссия может быть создана разными способами. Важно только, что в любом из них достигается увеличение кинетической энергии электронов. Часть из электронов с энергией eU, которая равна работе выхода $A_{вых}$ или больше ее, будут способны покинуть металл и образовать вокруг него облако электронов. Между металлом и этим облаком существует динамическое равновесие.

Диод. Односторонняя проводимость диода. Учащимся сообщают, что электронная лампа с двумя электродами (катодом и анодом) называется диодом. Катод в лампе может быть двух видов: прямого и косвенного накала. Необходимо разъяснить устройство подогрев-

ного катода. Вольфрамовая нить накала находится внутри фарфорового цилиндра, на который надет никелевый цилиндр. Эмитирует электроны активный слой, нанесенный на этот никелевый цилиндр. Чаще всего в качестве активного слоя используется оксид бария или стронция.

Учащихся можно спросить, зачем в диоде создается вакуум и почему подогревный катод столь сложно устроен, в частности зачем нужен фарфоровый цилиндр. Есть все основания ожидать от учеников таких ответов: «Вакуум необходим в первую очередь для удаления кислорода, в атмосфере которого накаленная нить легко сгорает. Удаление газа необходимо, кроме того, для того, чтобы движение электронов было свободным, чтобы на их пути практически ничего не встречалось».

«Фарфоровый цилиндр необходим для того, чтобы создать равномерность эмиссии электронов (тепловая инерция). Такой катод можно питать от источника переменного тока».

Диод обладает свойством односторонней проводимости, которое и обеспечивает широкое применение этих электронных приборов.

Вольт-амперная характеристика диода. Зависимость силы анодного тока от напряжения на участке анод—катод называют вольт-амперной характеристикой диода. Установка для снятия этой характеристики приведена на рисунке 9.26. В качестве диода можно использовать демонстрационный диод, источником тока служит ВУП-2, а измерительными приборами являются демонстрационные амперметр и вольтметр.

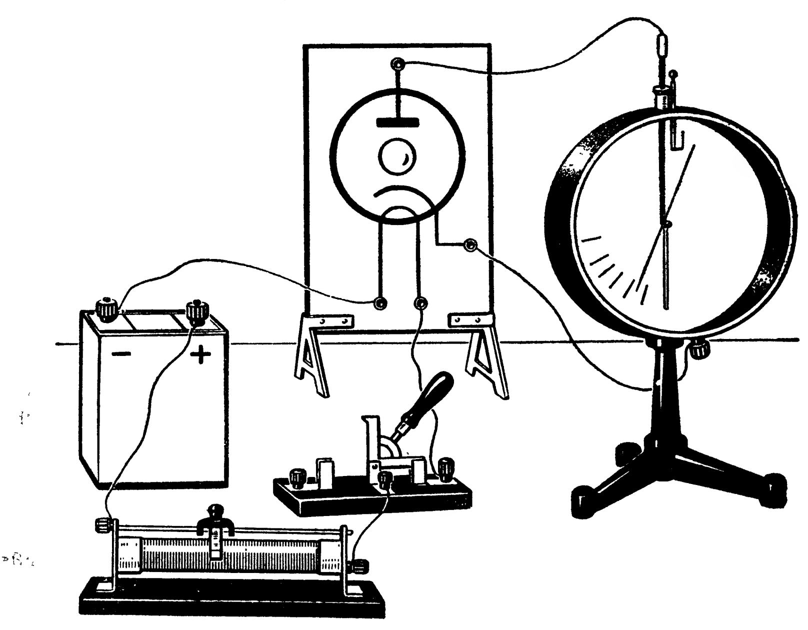


Рис. 9.25

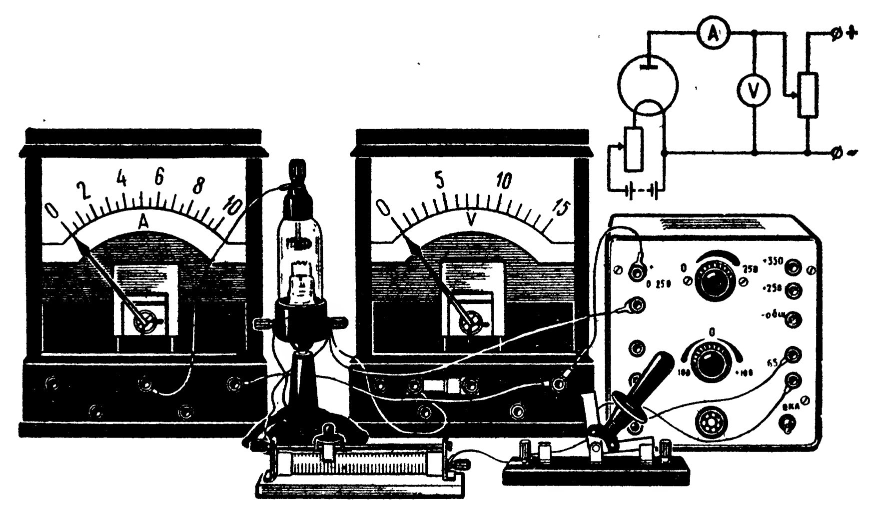


Рис. 9.26

Меняя анодное напряжение через 10 В, записывают значения силы анодного тока. Экспериментально полученные результаты сводят в таблицу, а с ее помощью строят график (рис. 9.27).

Учащимся необходимо объяснить, почему полученная зависимость нелинейна (играет роль пространственный заряд, возникающий в результате термоэлектронной эмиссии вблизи катода).

Причину возникновения тока насыщения $I_н$ учащиеся могут объяснить сами. Полезно выяснить в процессе обсуждения этого вопроса, что будет происходить, если начать изменять накал лампы (увеличивать, ослаблять). Учащиеся должны понять, что с увеличением накала растет эмиссия и пространственный заряд у катода увеличивается. Следовательно, увеличится и ток насыщения. При уменьшении накала ток насыщения будет меньше. Характер же зависимости силы тока от напряжения останется таким же. Учащиеся могут нарисовать семейство характеристик (рис. 9.28).

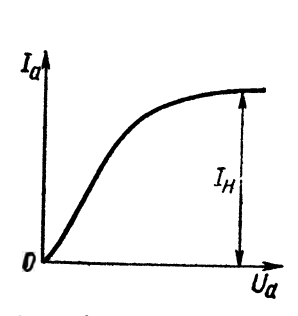


Рис. 9.27

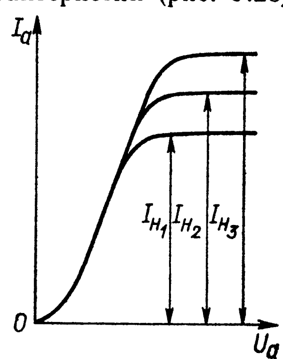


Рис. 9.28

Электроннолучевая трубка. После рассмотрения свойств электронных пучков переходят к изучению устройства, принципа действия и применений электроннолучевой трубки.

Пользуясь схемой (рис. 9.29), объясняют устройство электроннолучевой трубки. Сначала целесообразно рассмотреть трубку без системы управления лучом и без схемы электропитания. Все эти элементы будут вводиться постепенно.

Электроннолучевая трубка состоит из четырех основных элементов: колбы, в которой создан высокий вакуум, электронного прожектора, создающего сфокусированный и управляемый по интенсивности электронный пучок, системы отклонения луча и люминесцирующего экрана. Часто электронный прожектор называют «электронной пушкой». Этот элемент и должен быть рассмотрен наиболее подробно.

В горловине трубки расположен подогревный катод *1* (см. рис. 9.29). При накаливании током вольфрамовой нити *2* слой оксида бария или стронция *3*, расположенный на никелевой трубочке, начинает излучать электроны. Вокруг никелевой трубочки — катода установлен другой никелевый цилиндр с отверстием в торце — управляющий электрод *4*. На этот электрод обычно подают небольшой отрицательный потенциал относительно катода ($\approx$ 50 В). Регулируя значение этого потенциала, можно управлять потоком электронов. Изменяя число электронов, проходящих через управляющий электрод *4*, регулируют яркость пятна на экране трубки, покрытом люминесцирующим веществом *7*.

За управляющим электродом находится первый анод *5*, получивший название фокусирующего. Второй анод *6* называется ускоряющим (на него подается очень высокий положительный потенциал $\approx$ 800—3000 В). На фокусирующий анод подается примерно третья часть этого потенциала.

Хорошим упражнением для учащихся является изображение схемы включения электроннолучевой трубки. Надо сообщить только, что разные потенциалы на электроды трубки подаются с помощью потенциометра.

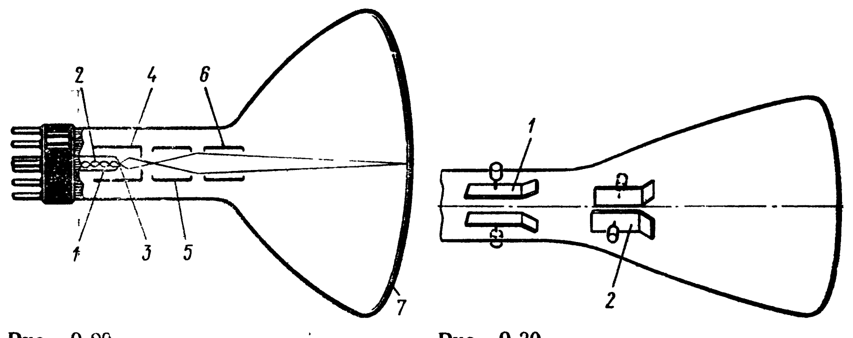


Рис. 9.29 Рис. 9.30

Управление электронным лучом демонстрируют на этой же установке, подавая на пластины горизонтального и вертикального отклонения пучка разные напряжения. Результаты эксперимента объясняют с помощью схемы (рис. 9.30). Горизонтально расположенные пластины *1* отклоняют луч по вертикали, а вертикально расположенные пластины *2* — по горизонтали.

Полезно выяснить с учащимися, какова траектория пролетающих электронов (между пластинами и после них).

Полезно при объяснении устройства и принципа действия электроннолучевой трубки показать первую часть учебного кинофильма «Электроннолучевая трубка». Это важно сделать потому, что в кинофильме процессы даны в динамике. Кроме того, объяснение работы развертки, применяемой в электронном осциллографе для получения осциллограмм, чрезвычайно затруднительно без использования такого наглядного пособия, как учебный кинофильм.

Вопрос о применении электроннолучевой трубки в осциллографе рассмотрен во второй части кинофильма.

11. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Этот материал может изучаться в следующей последовательности:

1-й урок. Электропроводимость полупроводников и ее зависимость от температуры и освещенности. Сравнение полупроводников с металлами и электролитами.

2-й урок. Собственная проводимость полупроводников.

3-й урок. Примесная проводимость полупроводников.

4-й урок. Электрический ток через контакт полупроводников. p — n-переход.

5-й урок. Полупроводниковый диод. Термо- и фотосопротивления. Применения полупроводников.

Первоначальные сведения о полупроводниках. Электрические свойства полупроводников следует рассматривать в сравнении со свойствами металлов и электролитов. Прежде всего сравнивают зависимости их сопротивлений от температуры. Демонстрации проводят с помощью набора полупроводниковых приборов.

Учащимся следует сообщить, что полупроводники чрезвычайно распространены в природе; так, в земной коре они составляют 4/5 всех входящих в кору веществ.

Характерной особенностью полупроводников является резкая зависимость их электропроводимости от внешних условий (температуры, давления, внешних полей, освещения, облучения ядерными частицами и т. п.), а также от примесей.

В средней школе демонстрируют зависимость сопротивления полупроводников от температуры на термосопротивлении [84, опыт 105] и изменение фотосопротивления от освещенности [84, опыт 107].

Учащихся знакомят с графиком (рис. 9.31) зависимости удельного сопротивления полупроводника от температуры (кривая 1) и для сравнения приводят аналогичную зависимость для металлов (прямая 2). Интересно обсудить, что удельное сопротивление ρ уменьшается с увеличением температуры и у электролитов, но зависимость ρ (*t*) не столь резкая, как у полупроводников.

Рис. 9.31

Такая реакция полупроводников на внешние воздействия дает возможность применять их в схемах автоматики. Лучше всего показать учащимся тепловое реле на полупроводнике, а также электронное фотореле с фоторезистором [84, опыт 109].

В конце урока желательно продемонстрировать первый фрагмент учебного кинофильма «Полупроводники и их применение в технике».

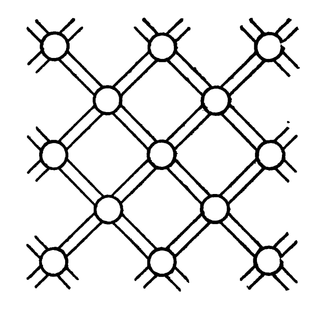


Рис. 9.32

Собственная и примесная проводимости полупроводников. Электропроводимость полупроводников получила полное объяснение в квантовой механике на основе зонных представлений. В средней школе приходится ограничиваться объяснением электропроводимости на основе модельных представлений о ковалентных связях в кристаллах, например в кристаллах кремния или германия. На рисунке 9.32 приведена схема ковалентных связей в кристалле кремния. Каждый атом имеет четыре валентных электрона и поэтому с соседними атомами имеет по две связи.

Так как объяснение всех вопросов достаточно подробно излагается в учебной и методической литературе, ограничимся лишь перечислением вопросов, которые следует обсудить с учащимися на этой модели:

1) Если температура близка к абсолютному нулю, то полупроводник не обладает электропроводимостью, так как все связи между атомами не нарушены.

2) При увеличении температуры или при внешних воздействиях часть связей нарушается и в полупроводнике появляются «свободные» электроны, способные перемещаться под действием сил электрического поля.

3) Вакантные места, оставшиеся после отрыва электронов («дырки»), также движутся в электрическом поле.

Учащиеся должны понять, что в действительности движутся электроны связи, но происходит в итоге как бы перемещение дырки. Для разъяснения этого полезна аналогия со свободным местом в зрительном зале. Зрители пересаживаются (движутся они!), а свободное место тоже перемещается.

4) Если полупроводник попадает в электрическое поле, то в упорядоченное движение приходят как электроны проводимости, так и «дырки» (в указанном выше смысле). Общий ток в полупроводнике равен сумме этих токов ($I = I_э + I_д$), причем в чистых полупроводниках $I_э = I_д$.

Чтобы учащиеся увидели всю картину в динамике, целесообразен показ соответствующего фрагмента кинофильма «Полупроводники и их применение в технике».

Примесную проводимость объясняют так: заменяем один из атомов четырехвалентного кремния атомом пятивалентного мышьяка или атомом трехвалентного индия. В первом случае будет лишний электрон. Такие примеси дают проводимость электронного типа, ее еще называют *n*-проводимостью, а проводник с такой примесью — полупроводником *n*-типа. Во втором случае возникает от атома примеси «дырка». Такой полупроводник называют полупроводником *p*-типа.

Интересно сообщить учащимся такие сведения. При комнатной температуре в идеально чистых от примесей полупроводниках имеют порванные связи приблизительно 10^{-7}% атомов. Если в данный полупроводник ввести такую же ничтожную примесь (0,0000001% атомов), то его проводимость возрастет вдвое. А как же возрастет проводимость при внесении примеси в количестве 0,001% от общего числа атомов? Простой подсчет покажет, что проводимость возрастет в 10^5 раз! В этом случае собственной проводимостью можно просто пренебречь и считать, что вся проводимость только примесная.

Для уяснения всего этого материала учащимся следует показать соответствующий фрагмент кинофильма «Полупроводники и их применение в технике».

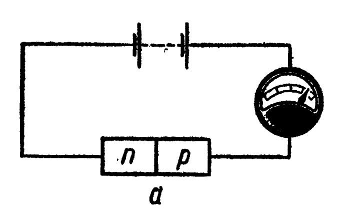
***n—p*-переход.** Объяснение *n*—*p*-перехода следует начинать с опытов, выясняющих его свойства. А свойства эти таковы: сопротивления этого контактного слоя двух примесных полупроводников *n*- и *p*-типа различны в разных направлениях. Далее объясняют эти свойства с помощью следующих схем.

Вначале (рис. 9.33) объясняют, что при контакте *n*- и *p*-полупроводников происходит диффузия основных носителей из одного полупроводника в другой. В итоге приконтактная часть обедняется основными носителями и ее сопротивление возрастает. Процесс диффузии прекращается, так как возникает двойной слой, препятствующий движению зарядов.

n	*p*
⊖ ⊖ ⊖	⊕ ⊕ ⊕
⊖ ⊖ ⊖ ⊖	⊕ ⊕ ⊕ ⊕
⊖ ⊖ ⊖ ⊖	⊕ ⊕ ⊕ ⊕
⊖ ⊖ ⊖	⊕ ⊕ ⊕

Рис. 9.33

Включим теперь этот полупроводник с *n* — *p*-переходом в электрическую цепь (рис. 9.34, *а*, *б*). В первом случае (рис. 9.34, *а*) электрическое поле перемещает основные носители к контакту и сопротивление контакта будет падать, а ток в цепи растет. Во втором случае (рис. 9.34, *б*)



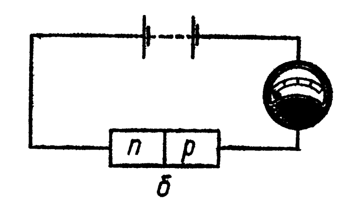


Рис. 9.34

под действием электрического поля основные носители от контакта будут расходиться в разные стороны, область контакта еще больше обеднится основными носителями, сопротивление ее возрастет, а сила тока в цепи станет маленькой.

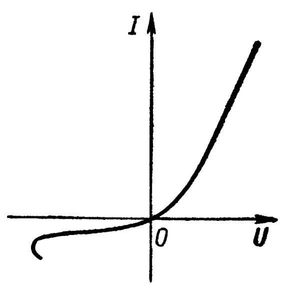


Рис. 9.35

В динамике процессы в *n — p*-переходе хорошо показаны в соответствующем фрагменте кинофильма «Полупроводники и их применение в технике».

Полупроводниковый диод и его применения. Устройство полупроводникового диода следует объяснить с помощью таблицы, а действие его и применения — показать на опытах.

Основное свойство полупроводникового диода, как и вакуумного,— односторонняя проводимость. Однако вольт-амперная характеристика полупроводникового диода (рис. 9.35) отличается от характеристики вакуумного диода наличием обратного тока, который в вакуумном диоде практически отсутствует.

Полупроводниковые диоды применяют в основном для выпрямления тока [84, опыт 117].

Рассматривая применения полупроводниковых приборов, следует остановиться еще на термисторах, фоторезисторах и полупроводниковых фотоэлементах [84, опыт 118].

Транзисторы (полупроводниковые триоды) в основном курсе физики не рассматриваются, их изучают на факультативных занятиях.

12. ОБОБЩЕНИЕ И СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ЗНАНИЙ УЧАЩИХСЯ ПО ТЕМЕ «ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК»

Тема «Постоянный электрический ток» очень насыщена материалом, поэтому в конце ее изучения необходимо провести обобщение и систематизацию всех знаний по теме, повторить основные понятия и вопросы темы.

Повторение можно проводить различными способами: провести обобщающий семинар по теме с предварительным распределением заданий учащимся, или обобщающую конференцию с докладами

учащихся, или просто урок повторения, обобщения и систематизации знаний, на котором учащиеся будут отвечать на вопросы учителя. Предоставив выбор формы повторения, обобщения и систематизации материала учителю, выделим те моменты, подходы и понятия, которые надо обсудить.

1. Условия существования электрического тока. Учащиеся должны их сформулировать и пояснить, вспомнить опыты, которые показывал учитель на уроке.

2. Особенности стационарного электрического поля, отличие его от статического. При обсуждении этого вопроса учащиеся должны начертить картину силовых линий в случаях электростатического и стационарного полей, распределение потенциала в проводнике в том и другом случае.

Можно предложить учащимся заполнить таблицу (см. табл. 9.1).

Таблица 9.1

Вид поля \ Характерные свойства поля	Напряженность $\vec{E}$ внутри проводника	Напряженность $\vec{E}$ вне проводника	Потенциал φ на поверхности и внутри проводника	Картина линий напряженности
1. Электростатическое				
2. Стационарное				

3. Различные виды проводимости в случае стационарного электрического тока. Здесь учащиеся должны четко знать, что́ является носителями электрического тока в проводниках разного рода и в полупроводниках, характер зависимостей тока от напряжения (вольт-амперные характеристики) и основные практические применения явлений.

Целесообразно предложить учащимся заполнить следующую таблицу (табл. 9.2):

Таблица 9.2

Вопросы \ Вид проводника	Металлы	Электролиты	Газы. Вакуум	Полупроводники
1. Носители электрического заряда				
2. Зависимость тока от напряжения				
3. Технические применения				

В целях развития политехнического кругозора учащихся необходимо подробно рассмотреть технические применения постоян-

ного тока (различные нагреватели, осветители разных типов; газоразрядные и ионные приборы, полупроводниковые приборы и т. п.) [78].

ГЛАВА 10

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ТОКА

Первоначальные сведения о магнитном поле учащиеся получают в курсе физики VII класса. Затем в IX классе перед началом изучения электродинамики, в пропедевтическом плане эти сведения желательно расширить и обобщить, дав учащимся представление о магнитном поле как частном случае электромагнитного поля.

В настоящее время принято такое изучение магнетизма, когда прежде всего рассматривается магнитное поле тока [15; 14, ч. III]. О свойствах постоянных магнитов, считающихся общеизвестными, упоминается попутно, обычно в связи с использованием в качестве индикатора магнитной стрелки и применением в экспериментах полосовых и дугообразных магнитов.

Как показывает опыт, краткие обобщенные сведения о свойствах постоянных магнитов все же должны быть сообщены учащимся в систематизированном виде. Не имея основных представлений о полях постоянных магнитов, учащиеся затрудняются в объяснении целого ряда важнейших физических экспериментов, решении задач и т. д. Они порой не могут изобразить графически и определить направление линий магнитной индукции, нередко не разграничивают некоторые свойства электрического и магнитного полей, смешивают взаимодействие полюсов магнита и электрических зарядов и т. д. Однако основное внимание в теме, разумеется, необходимо уделить фундаментальным опытам, показывающим возникновение между движущимися электрическими зарядами сил, отличных от кулоновских. Важнейшей задачей является также показ релятивистского характера этих сил.

Содержание программного материала видно из следующего примерного поурочного планирования темы:

1-й урок. Основные магнитные явления. Взаимодействие токов.
2-й урок. Магнитное поле. Магнитные стрелки и рамки с током как индикаторы магнитного поля.
3-й урок. Вектор магнитной индукции.
4-й урок. Линии магнитной индукции. Магнитное поле различных токов.
5-й урок. Гипотеза Ампера.
6-й урок. Магнитные свойства вещества. Магнитная проницаемость.
7-й урок. Ферромагнетики и их техническое применение.
8-й урок. Закон Ампера.

9-й урок.	Лабораторная работа «Наблюдение взаимодействия магнита и тока».
10-й и 11-й уроки.	Действие магнитного поля на движущийся заряд. Сила Лоренца. Электродвигатели постоянного тока.
12-й урок.	Упражнения.
13-й урок.	Повторение и обобщение материала или контрольная работа.

1. ОСНОВНЫЕ МАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Данный материал рекомендуется рассматривать на первом вводном уроке к теме с целью повторения, углубления и систематизации имеющихся у учащихся сведений о магнитных явлениях и магнитном поле.

Первое случайное знакомство человека с магнитными явлениями восходит к глубокой древности и состояло, по-видимому, в обнаружении притяжения магнитным железняком железных предметов. Магнетизм был известен отцу античной науки Фалесу Милетскому (IV в. до н. э.). О магнитах упоминает также Платон (IV в. до н. э.). В философской поэме «О природе вещей» Лукреций Кар (I в. до н. э.) использует слово «магнит», как производное от Магнезия — названия местности в Малой Азии, где добывали железную руду. Писал о свойствах магнита и Плиний в своей «Естественной истории» (I в. н. э.).

В физическом кабинете желательно иметь кусок магнитного железняка, с тем чтобы демонстрировать его магнитные свойства. Это всегда производит большое впечатление на учащихся. Первым практическим применением магнитов был компас. О первых компасах упоминается в летописях III в. до н. э. [38, т. 1, с. 21].

Компас изобретался и затем «забывался», видимо, независимо и многократно в разные времена и у разных народов. И хотя девятиклассники, разумеется, знакомы с компасом, желательно показать на уроке или рекомендовать для домашней самостоятельной работы несложные опыты по ориентации естественных и искусственных магнитов и электромагнитов в магнитном поле Земли [70].

В зависимости от знаний учащихся следует кратко повторить правило взаимодействия одноименных и разноименных полюсов постоянных магнитов и показать взаимодействие электромагнитов (рис. 10.1).

Аналогичные результаты опытов служат основанием для предположения о том, что магнитные явления обусловлены электрическими токами (движением электрических зарядов). Эту мысль далее желательно закрепить демонстрацией известного учащимся из курса физики VII класса опыта Эрстеда [13, рис. 309], рассмотрев его более подробно и применительно к токам в различных средах.

Используя представление о токе в проводах как направленном движении электронов, следует предположить, что магнитное поле должно существовать всюду, где движутся электрические заряды. Это предположение желательно закрепить соответствующими опытами или их описанием.

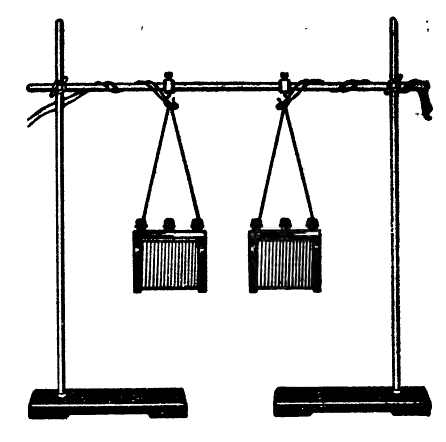


Рис. 10.1

Опыт по обнаружению магнитного поля тока в электролите затруднений не вызывает. Для этого достаточна сила тока в несколько ампер (этот ток протекает, например, через раствор поваренной соли или медного купороса, налитого в стеклянную трубку).

Опыт по обнаружению магнитного поля тока в газе сложнее, так как труднее получить достаточно большую для демонстрационных целей силу тока[1].

В школьных условиях удается опыт с чувствительной и достаточно большой стрелкой прибора инклинатора-деклинатора (рис. 10.2), расположенной параллельно спектральной трубке или лампе дневного света. Для лучшей видимости шкалы прибора ее следует расположить под некоторым углом к горизонтальной плоскости.

Наконец, желательно показать на опыте возникновение магнит-

[1] Данный опыт впервые проделал А. Ф. Иоффе в Петербурге в 1912 г.

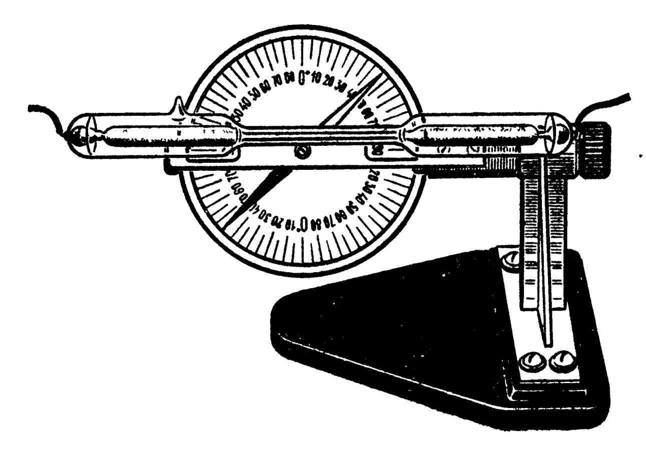


Рис. 10.2

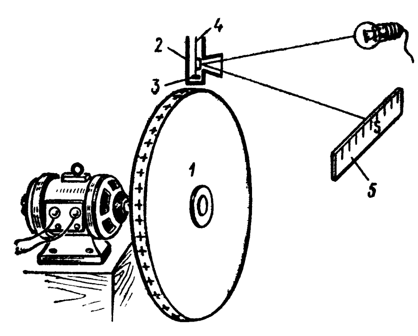


Рис. 10.3

ного поля при движении электрических зарядов в вакууме, воспользовавшись, например, телевизором. Для этого подносят магнитную стрелку к экрану телевизора и наблюдают, как через некоторое время после его включения, когда засветится экран, стрелка начинает колебаться, свидетельствуя о магнитном поле потока электронов в вакууме.

Следует также дать понятие о возникновении магнитного поля при механическом движении заряженных тел. В этих целях в ознакомительном плане или на внеклассных занятиях можно ознакомить учащихся со схемой классического опыта Роуланда — Эйхенвальда (рис. 10.3).

В этом опыте электрические заряды на вращающемся диске *1* создают магнитное поле, обнаруживаемое гальванометром *2*, чувствительным элементом которого является постоянный магнит *3*, закручивающий нить *4* подвеса. Об угле поворота магнита судят по перемещению зайчика по шкале *5*.

На основе всех экспериментов учащиеся должны уяснить, что вокруг движущихся зарядов существует магнитное поле.

2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТОКОВ

Соответствующие понятия формируются на основе анализа опытов по взаимодействию параллельных проводников с током. В качестве проводников лучше всего использовать мягкие изолированные телефонные провода или станиолевые ленты [57, ч. 2, опыт 166]. Из опыта следует, что движущиеся заряды могут не только отталкиваться, но и притягиваться. Значит, это не кулоновские силы, а какие-то иные. Необходимо пояснить, что электрическим взаимодействием проводников в данном случае вообще можно пренебречь ввиду практически полной компенсации в них положительных и отрицательных зарядов.

В доступной форме нужно довести до учащихся мысль о том, что в общем случае на движущийся заряд q действует электрическая сила $\vec{F}_э = q\vec{E}$ и некоторая дополнительная «магнитная» сила $\vec{F}_м$ (с математическим выражением этой силы учащиеся познакомятся позже). Отметим, что возникновение «магнитной» силы является «релятивистским эффектом», зависящим от скорости $\vec{v}$ перемещения зарядов в избранной системе отсчета. В данном случае скорость зарядов относительно проводников (Земли) составляет доли миллиметров в секунду. Чем меньше скорость (точнее, отношение v^2/c^2), тем слабее магнитное взаимодействие. При скорости, равной нулю, взаимодействие прекращается.

3. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ. МАГНИТНЫЕ СТРЕЛКИ И РАМКИ С ТОКОМ КАК ИНДИКАТОРЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Опыты, показанные на предыдущем уроке, позволяют продолжить формирование понятия о магнитном поле и его свойствах. Для этого прибегают к следующему объяснению опытов. Вокруг проводника с током, как уже известно по опыту Эрстеда, существует магнитное поле. Оно и действует непосредственно на второй проводник, точнее, на его *движущиеся* заряды. Для акцентирования внимания учащихся на этом факте полезно сопоставить магнитное поле с полем электростатическим. Известное учащимся электрическое поле, существующее в пространстве вокруг электрических зарядов, обнаруживается по его действию на электрические заряды. (В школьных опытах обычно используют заряженные тела.) При этом не важно, движутся электрические заряды или покоятся. Магнитное же поле действует только на движущиеся электрические заряды.

Для уточнения и закрепления данного вывода полезно показать следующие опыты:

1. Около электромагнита (рис. 10.4) располагают магнитную стрелку и наэлектризованный маятник. При включении тока магнитная стрелка поворачивается, обнаруживая магнитное поле. Положение же маятника не изменяется.

2. На экране осциллографа получают яркое пятно, свидетельствующее о попадании на экран потока электронов. Подносят к пятну постоянный дугообразный магнит и обнаруживают смещение движущихся зарядов под действием магнитного поля.

Из всего изученного следует, что индикаторами магнитного поля могут служить магнитные стрелки, проводники с током и свободно движущиеся электрические заряды. При этом во всех рассмотренных случаях в конечном итоге магнитное поле обнаруживалось благодаря его действию именно на движущиеся электрические заряды.

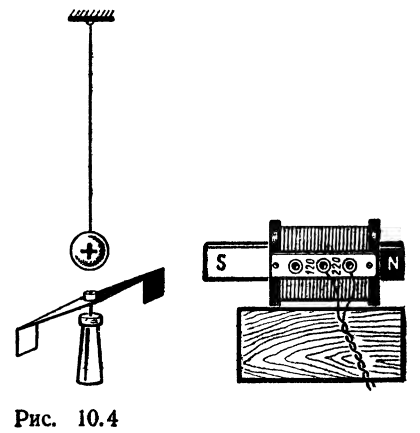


Рис. 10.4

На практике используются все случаи: магнитная стрелка применяется, например, для исследования магнитного поля Земли, движение проводника с током используется, например, в гальванометрах, а действие магнитного поля на движущиеся заряды в вакууме — в кинескопах телевизоров. Проводник с током является очень удобным индикатором магнитного поля. Однако поскольку практически получить маленький изолированный отрезок проводника с

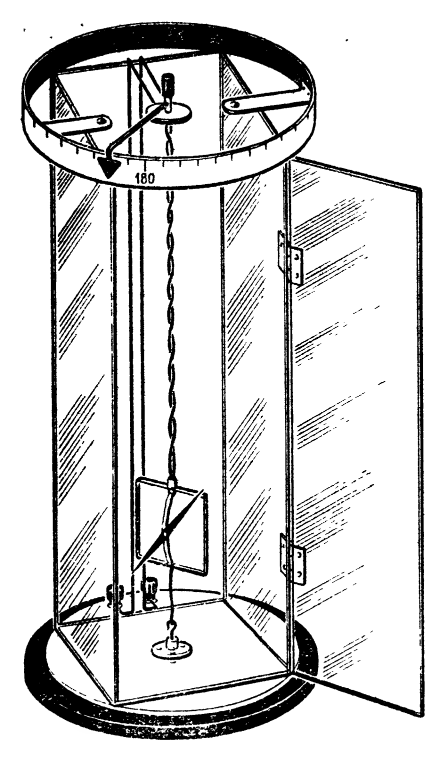


Рис. 10.5

током невозможно, то используют маленькую рамку с током, подобно тому как в электростатике используют небольшое заряженное тело. Исследование магнитного поля с помощью маленького «чувствительного» витка желательно показать на опыте. На рамку, например, из пенопласта размером 40 × 40 мм наматывают 50—100 витков провода диаметром 0,08—0,13 мм в лаковой изоляции. Рамку подвешивают в деревянном или плексигласовом каркасе подобно тому, как это делается в зеркальных гальванометрах. Перпендикулярно плоскости рамки, в ее середине, в пенопласте укрепляют деревянную спицу (рис. 10.5).

Для пояснения действия прибора по витку пропускают ток и обнаруживают его поворот в магнитном поле Земли. При достаточной силе тока виток располагается так, что нормаль к его плоскости почти совпадает с направлением оси S — N магнитной стрелки. Различие в направлениях стрелки и нормали объясняют упругостью нити подвеса. Аналогичный опыт полезно поставить с подвешенной катушкой от школьного универсального трансформатора и с помощью гальванического элемента, замкнутого на катушку, плавающую в растворе электролита (рис. 10.6). В последнем случае ввиду особенностей сил жидкого трения катушка располагается строго по магнитному меридиану. Полезно также продемонстрировать «изучение» с помощью витка с током магнитного поля в некотором пространстве. Для этого, например, перемещают прибор по демонстрационному столу и «неожиданно» обнаруживают резкий поворот рамки вблизи какого-либо предмета, например картонного ящика, в котором спрятан магнит, около массивных железных предметов и т. п. Аналогичные опыты проделывают и с магнитной стрелкой, показывая тождественность ее поведения с поведением рамки с током. Следовательно, магнитное поле оказывает на рамку с током, так же как и на магнитную стрелку, ориентирующее действие.

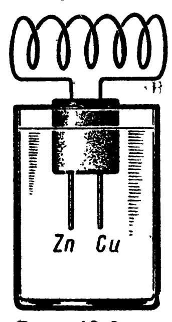


Рис. 10.6

В итоге изучения данного материала учащиеся должны твердо усвоить: вокруг движущегося в избранной системе отсчета заряда существует магнитное поле; это поле оказывает действие на движущиеся в этой же системе отсчета другие заряды.

Магнитное поле материально. Оно влияет на многие физические явления, процессы и свойства тел. Поэтому исследование действия магнитного поля на движущиеся заряды является основной задачей при изучении магнетизма.

4. ВЕКТОР МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ — ОСНОВНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Полученные учащимися первоначальные сведения о магнитном поле подготавливают их к пониманию того, что это поле должно иметь свою силовую характеристику, подобно электрическому полю, силовой характеристикой которого является напряженность $\vec{E}$.

В неявном виде эта характеристика используется и самими учащимися. Выражения «сильный» или «слабый» магнит, «сильное» или «слабое» магнитное поле уже предполагают количественную меру магнитного поля. В настоящее время силовой характеристикой магнитного поля, изучаемой в средней школе, является вектор магнитной индукции $\vec{B}$. Существует два основных способа введения данной величины:

1. Использование действия магнитного поля на прямолинейный участок проводника с током и формулы Ампера $|\vec{F}| = |\vec{B}|\, I\Delta l \sin\alpha$ [14, ч. III; 18, ч. IV]. При $\sin\alpha = 1$ магнитная индукция $|\vec{B}| = \frac{|\vec{F}|}{I\Delta l}$ получает наглядную для учащихся интерпретацию как величина, численно равная силе, действующей на единицу длины проводника при прохождении по нему тока в 1 А.

2. Использование понятия о моменте сил, действующих на магнитную стрелку или рамку с током [2; 21, т. II].

Поскольку действующей программой по физике не предусмотрено введение понятия о моменте сил как векторной величине, то на основе соотношения $M_{max} = |\vec{B}|\, IS$ определяют только модуль вектора $\vec{B}$: $|\vec{B}| = \frac{M_{max}}{IS}$. Направление же вектора $\vec{B}$ поля постоянных магнитов или токов определяют специальными правилами.

Второй способ введения понятия о векторе магнитной индукции в большей мере соответствует специфике магнитного поля по сравнению с электрическим, различию величин $\vec{B}$ и $\vec{E}$.

Показывая различный по углу поворот рамки в магнитном поле проводника с различной силой тока или различных магнитов, нетрудно дать первоначальное представление о том, что магнитные силы могут характеризоваться поворотом рамки с током или стрелки в магнитном поле. Для установления же количественного соот-

ношения $M_{max} = |\vec{B}|\ IS$ необходим специальный прибор и серия опытов с ним. В качестве такого упрощенного демонстрационного прибора может быть использован виток-индикатор (см. рис. 10.5), если нить его подвеса закрепить во вращающейся головке, к которой прикреплена стрелка. Для измерения угла закручивания нити прибор снабжен круговой шкалой, разделенной на градусы.

Демонстрация осложняется тем, что величина $\vec{M}$ — векторная: $\vec{M} = [\vec{p}\vec{B}]$, где магнитный момент $\vec{p} = IS\vec{n}$ ($\vec{n}$ — единичный вектор, направление которого определяют по правилу правого винта). Следовательно, $M = |\vec{B}|\ IS \sin \alpha$, где α — угол между векторами $\vec{n}$ и $\vec{B}$. Поскольку в средней школе не вводится понятие о моменте сил как векторной величине, то рассматривается только соотношение $M_{max} = |\vec{B}|IS$. А это значит, что в опытах угол между нормалью $\vec{n}$ и вектором $\vec{B}$ должен быть постоянным и равным 90°.

Для показа зависимости $M \sim I$ легче всего воспользоваться демонстрационным гальванометром. Рамка гальванометра с током находится практически все время в однородном радиальном поле, которое создается в зазоре между полюсными наконечниками и цилиндром. В дополнение к этому опыту, недостатком которого является необходимость объяснения специального строения магнитного поля, следует показать явление в упрощенном и более наглядном виде с помощью демонстрационной рамки (см. рис. 10.5). Поместив рамку между полюсами сильных магнитов (или электромагнитов), пропускают по ней ток, измеряемый миллиамперметром (демонстрационным гальванометром со специально подобранным шунтом).

После этого поворачивают головку прибора, к которой присоединены подводящие ток провода и стрелка, возвращающая рамку в первоначальное положение.

Замечают угол закручивания нити подвеса α. Затем увеличивают ток в два (три) раза и обнаруживают, что угол α, а следовательно и вращающий момент M, увеличивается тоже в два (три) раза. Для демонстрации зависимости $M \sim S$ нужно изготовить несколько витков одинаковой длины, площади которых отличаются в целое число раз. Например, $S_1 : S_2 : S_3 = 3 : 2 : 1$, при $S = 0$ $M = 0$. Это уже бифилярный провод, на который не действует магнитное поле. Демонстрацию можно показать и с одним витком, произвольно изменяя на глазах учащихся его форму и площадь. Для данного магнитного однородного поля опытным путем устанавливают, что $M_1 \sim I_1 S_1$.

Для того чтобы записать эту зависимость в виде равенства, нужно использовать некоторый коэффициент. Он обозначается буквой B. $M_1 = B_1 I_1 S_1$. Аналогичное соотношение можно записать и для какого-либо иного, например, более «сильного» магнитного поля. При тех же значениях I_1 и S_1 $M_2 = B_2 I_1 S_1$. При этом, оче-

видно, $|\vec{M}_2| > |\vec{M}_1|$ и, следовательно, $|\vec{B}_2| > |\vec{B}_1|$. Величина $\vec{B}$, называемая магнитной индукцией, и характеризует поле в избранной точке пространства.

Направление вектора магнитной индукции $\vec{B}$ в каждой точке магнитного поля совпадает с направлением оси магнитной стрелки S — N и с нормалью $\vec{n}$ витка с током. После этого вводят единицу магнитной индукции 1 Н/(А · м), носящую название т е с л а (обозначается: Тл).

5. СПОСОБЫ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Изучение различных магнитных полей требует измерения соответствующих магнитных величин. Простейшими индикаторами и измерителями в принципе могут служить известные учащимся магнитные стрелки и рамки с током на упругих подвесах или со спиральными пружинами, создающими противодействующий момент, как у рамок магнитоэлектрических измерительных приборов. По данному принципу построены демонстрационные индикаторы [84]. К сожалению, они не позволяют осуществлять зондирование магнитного поля в малых объемах пространства. Сконструированные же в настоящее время индикаторы — зонды магнитного поля — действуют на иных принципах.

Для обнаружения магнитного поля и измерения магнитной индукции в различных точках его могут быть использованы не только механические силы, но и многие другие проявления поля: 1) изменение электрического сопротивления металлов; 2) возникновение ЭДС в движущихся проводниках; 3) намагничивание тел; 4) отклонение электронного луча; 5) возникновение ЭДС в проводнике с током (эффект Холла); 6) изменение объемов некоторых тел в магнитном поле (магнитострикция) и др. [55].

Первый из указанных принципов используется в приборах, где чувствительным элементом является висмутовая спираль, сопротивление которой зависит от магнитного поля (рис. 10.7). Но этот прибор пригоден для измерений в сильных полях [21, т. II].

Второй принцип используется в индикаторах. Основу индикаторов составляет якорь с коллектором, который приводится во вращение электромоторчиком [57, ч. 1, опыт 170].

О магнитной индукции поля судят по силе индукционного тока, подаваемого с якоря на гальванометр. Прибор позволяет определять направление и модуль вектора $\vec{B}$ даже слабых магнитных полей. Важно также, что принцип действия прибора понятен учащимся. Более надежен в эксплуатации ферромагнитный индикатор [57, ч. 1, опыт 170], хотя принцип его устройства объяснить учащимся значительно сложней.

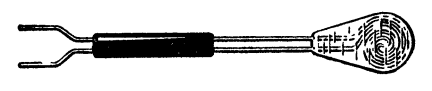


Рис. 10.7

6. ЛИНИИ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ РАЗЛИЧНЫХ ТОКОВ

В начале урока, посвященного данной теме, полезно восстановить в памяти учащихся сведения о «магнитных линиях» магнитного поля, первоначальное понятие о которых они получили в VII классе [13].

В этих целях полезно показать опыт с магнитными стрелками (рис. 10.8) и железными опилками [2; 67], расположенными вокруг провода с током. На основе этих опытов и изученных ранее сведений о векторе магнитной индукции магнитными линиями или линиями магнитной индукции называют такие линии, в каждой точке которых вектор $\vec{B}$ направлен по касательной к ним. Здесь же следует ввести и правило буравчика (рис. 10.9) для определения направления вектора $\vec{B}$ в магнитном поле прямолинейного проводника с током. Далее с помощью имеющихся в школе индикаторов следует вместе с учащимися исследовать магнитное поле различных токов. Измерения покажут, что вектор $\vec{B}$ в любой точке поля лежит в плоскости, перпендикулярной проводнику, и направлен по касательной к окружности, через центр которой проходит проводник. Следовательно, магнитное поле прямого тока обладает цилиндрической симметрией. Легко также показать, что вблизи провода поле «сильнее», чем вдали от него. В пределах точности измерений можно установить, что модуль вектора $\vec{B}$ убывает обратно пропорционально расстоянию от провода $\left(|\vec{B}| = \mu\mu_0 \frac{I}{2\pi R}\right)$. Сопоставляя данные измерений с картиной магнитного спектра, дают понятие о том, что при графическом изображении поля линии индукции условились располагать гуще в тех местах поля, где больше модуль индукции $\vec{B}$, т. е. абсолютное значение вектора индукции характеризуется густотой линий индукции.

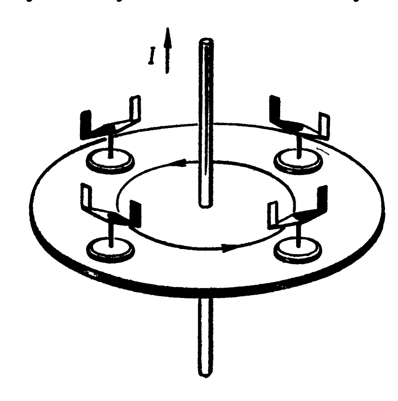


Рис. 10.8

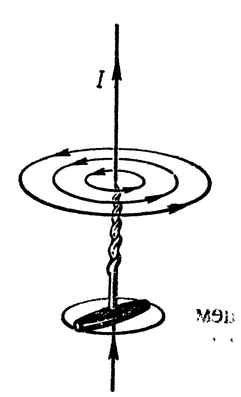


Рис. 10.9

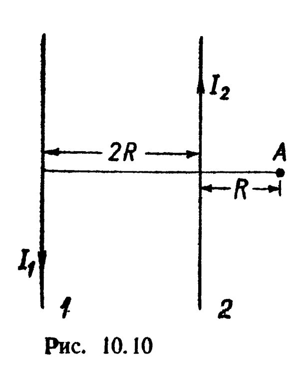


Рис. 10.10

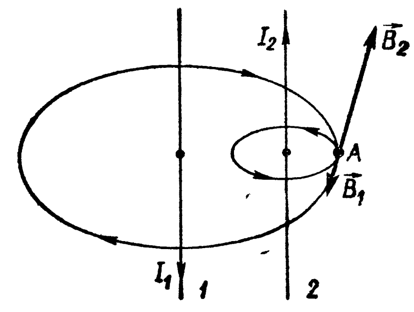


Рис. 10.11

Для изучения последующего материала о магнитных полях проводников с токами различной формы полезно дать учащимся понятие о сложении векторов магнитной индукции $\vec{B}$.

По аналогии с суперпозицией электрических полей заключают, что векторы $\vec{B}$ магнитного поля должны складываться, как и векторы $\vec{E}$, геометрически.

Для закрепления данного понятия полезно решить следующие задачи.

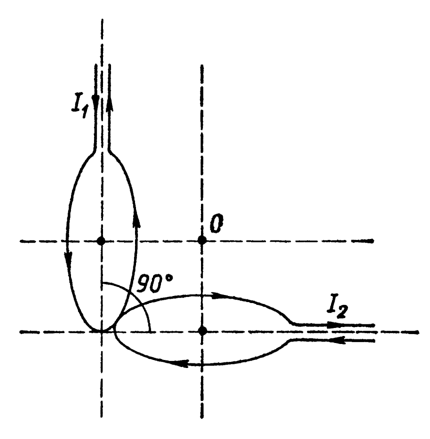


Рис. 10.12

1. Изобразить графически вектор $\vec{B}$ суммарного поля в средней точке между двумя параллельными проводниками, по которым протекают токи ($I_1 = I_2$): а) одного и того же направления; б) противоположного направления.

2. По параллельным проводникам *1* и *2* (рис. 10.10), расположенным на расстоянии $2R$ друг от друга, протекают противоположно направленные токи; силы токов одинаковы. Изобразить графически вектор магнитной индукции $\vec{B}$ суммарного поля токов в точке *A* на расстоянии *R* от проводника *2*.

Решение. Применим правило буравчика к проводнику *1* и изобразим вектор $\vec{B}_1$ магнитного поля этого тока (рис. 10.11). Аналогично изобразим вектор $\vec{B}_2$ магнитного поля проводника *2*. Точка *A* находится от проводника *1* на расстоянии, в три раза большем, чем от проводника *2*. Поэтому на основании рассмотренных выше опытов можно заключить, что

$$|\vec{B}| = |\vec{B}_2| - |\vec{B}_1| = \frac{2}{3}|\vec{B}_2|.$$

В качестве домашнего задания полезно дать учащимся подобную задачу для двух параллельных токов одного направления.

3. Изобразить графически направление вектора магнитной индукции двух круговых токов (рис. 10.12), лежащих во взаимно перпендикулярных плоскостях, в точке *О* пересечения их осей.

Решение этой задачи желательно проверить на опыте, поместив в точку *О* магнитную стрелку или зонд.

Полезно решить аналогичную задачу, изменив направление токов в витках.

4. Изобразить линии магнитной индукции витка с током и нескольких последовательно соединенных витков (соленоида).

При изображении линий магнитной индукции витка учащиеся должны использовать сведения, полученные при решении приведенных выше задач, располагая линии гуще там, где больше модуль магнитной индукции $\vec{B}$. При изображении линий магнитной индукции соленоида достаточно вначале рассмотреть магнитное поле двух соседних витков.

Рисунки учащихся затем обязательно проверяются демонстрацией соответствующих магнитных спектров.

Возможен и иной порядок изучения данного вопроса: вначале демонстрируют спектры витка и соленоида, а затем уже теоретически выясняют, как располагаются линии магнитной индукции.

При изучении поля соленоида обращают внимание на почти параллельные ряды железных опилок внутри витков, что говорит об однородности поля. На концах же соленоида линии индукции расходятся веером. Это значит, что поле неоднородно. Особо подчеркнем, что из сопоставления соленоида и постоянного полосового магнита следует, что места неоднородности магнитного поля соленоида соответствуют магнитным полюсам. Тот конец соленоида, из которого выходят линии магнитной индукции и где поле неоднородно, подобен северному полюсу магнита. Противоположный конец соленоида является южным полюсом.

Линии магнитной индукции во многом напоминают силовые линии электрического поля. Однако между ними имеется и существенное различие. Это ясно обнаруживается, например, при сравнении электрического поля заряда и магнитного поля проводника с током. Эти поля желательно сопоставить, обратив внимание на то, что электрические силовые линии начинаются на положительном заряде и уходят в бесконечность (или кончаются на отрицательном заряде). Можно также сопоставить линии напряженности электрического поля и линии индукции магнитного поля движущихся в вакууме электрических зарядов, например электронов.

Во всех случаях (движущиеся заряды в вакууме, в прямолинейном проводнике, в соленоиде и т. д.) линии магнитной индукции $\vec{B}$ замкнуты. Поэтому магнитное поле называют вихревым.

7. ГИПОТЕЗА АМПЕРА. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА

Впервые мысль о том, что магнитные явления вызываются исключительно электрическими, была высказана и развита Ампером, который «с самого начала своих работ предположил, что действия тока на магнит, тока на ток и магнита на магнит представляют такую триаду явлений, в которых не может не быть единства» [32, с. 179].

Взаимосвязь электричества и магнетизма менее всего очевидна для постоянных магнитов. Для ее понимания, следуя Амперу, важно правильно понять «полную аналогию между взаимодействием магнитов и взаимодействием соленоидов... Ампер пришел к выводу, что замкнутый ток должен считаться эквивалентным элементарному магниту, который можно представить в виде «магнитного листка», т. е. воображаемой бесконечно тонкой пластинки магнитного материала, одна сторона которой есть один полюс, а другая — другой полюс» [32, с. 184].

Эту аналогию совокупности витков соленоида и магнита полезно пояснить на примере стопки тонких круглых керамических магнитов, образующих один магнит с двумя полюсами на концах.

Первоначально Ампер полагал, что в магнитах существуют макроскопические соленоидообразные токи, обтекающие их поверхности. Электрическими токами, текущими в параллельных экватору плоскостях, Ампер объяснял и магнетизм Земли. Затем Ампер принял и развивал идею Френеля об элементарных токах, существующих вокруг каждой молекулы магнита [32, с. 202].

Гипотезу Ампера поясняют с помощью рисунков [2, рис. 236, *а*, *б*].

С современной точки зрения основная идея гипотезы Ампера — объяснение магнитных свойств тел элементарными электрическими токами — применима к любым веществам в любом агрегатном состоянии. При этом нужно иметь в виду следующее.

Магнитные свойства вещества зависят от магнитных моментов их молекул, которые равны геометрической сумме орбитальных и спиновых магнитных моментов всех электронов и магнитных моментов ядер.

Если магнитный момент молекул равен нулю, вещество диамагнитно, если не равен нулю — парамагнитно.

Основное внимание уделяют изучению ферромагнетиков — веществ с наиболее ярко выраженными магнитными свойствами. Для учителя заметим, что в атомах большинства элементов (пара- и диамагнетиков) спины электронов попарно компенсируют друг друга и поэтому их магнитные свойства определяются в основном магнитными моментами электронов. У ферромагнетиков же имеются нескомпенсированные спины, поскольку у них не заполнена одна из внутренних оболочек (у железа незаполненная М-оболочка содержит 14 вместо 18 электронов). В результате этого атомы ферромагнетика обладают постоянным спиновым магнитным моментом.

При этом ферромагнетик имеет минимум энергии, необходимой для его устойчивого состояния при параллельной ориентации спинов. Важной особенностью ферромагнетиков является их структура. Небольшие (10^{-6}—10^{-9} см^3) объемы ферромагнетика оказываются самопроизвольно намагниченными до полного насыщения. В целом же без воздействия внешнего поля ферромагнетик не обладает намагниченностью.

В отличие от пара- и диамагнетиков ферромагнетики могут сохранять намагниченное состояние, или, как говорят, обладать остаточным магнетизмом.

Остаточный магнетизм объясняется взаимодействием (сцеплением) доменов, своего рода трением, которое не позволяет тепловому движению дезориентировать магнитные моменты доменов.

Учащимся природу ферромагнетизма объясняют в самом общем виде как результат собственного вращательного момента (спина) электронов ферромагнетиков, а с их основными свойствами знакомят на опытах.

Для создания у учащихся наглядных образов о доменной структуре можно поставить вводный опыт со стальными опилками, помещенными в пробирку. Опилки намагничивают при помощи электромагнита и демонстрируют притяжение ими железных предметов. Встряхнув опилки, обнаруживают, что они вследствие беспорядочного расположения почти полностью потеряли свои магнитные свойства.

В соответствии с программой доменная структура ферромагнетиков должна быть продемонстрирована на опыте Баркгаузена. Для этого наматывают на железную проволоку длиной 30—40 см несколько тысяч витков тонкого провода, концы которого присоединяют ко входу усилителя низкой частоты (УНЧ-3, усилитель киноаппарата и т. п.). Перемещая около витков постоянный магнит, воспринимают на слух шорохи и щелчки, которые вызываются токами, индуцированными в результате перемагничивания доменов. Скачки Баркгаузена можно показать также на электронном осциллографе.

Учащиеся должны получить понятие о зависимости магнитных свойств от температуры. Качественно изменение магнитных свойств с повышением температуры можно показать следующим образом.

Конец намагниченного ножовочного полотна с притянувшимся к нему лезвием безопасной бритвы помещают в пламя газовой горелки, примуса или паяльной лампы. (Со спиртовкой опыт может не получиться, так как температура Кюри для железа 753 °С.) Нагрев лезвие до белого каления, наблюдают, как оно, став парамагнетиком, падает под действием собственной тяжести. Остывшее лезвие будет снова притягиваться к ножовочному полотну. Возможны и другие варианты опыта [79, рис. 45; 57, ч. 1, опыт 180]. После этих демонстраций, поясняющих особенности строения ферромагнетиков, следует показать на опыте их важнейшее свойство: у ферромагнетиков $\mu \gg 1$.

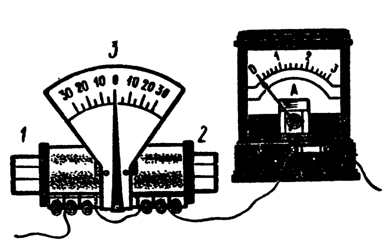
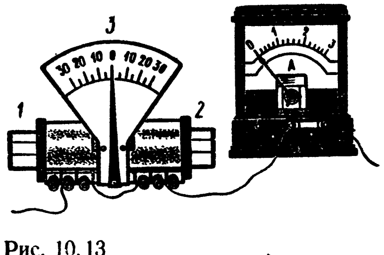



Рис. 10.13

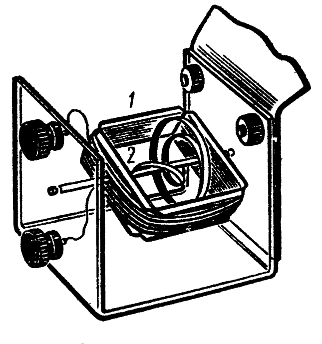


Рис. 10.14

Качественно это легко сделать, исследуя с помощью магнитной стрелки магнитное поле вокруг катушки с током, в которую затем для его усиления вставляют железный сердечник.

Вариантом может служить установка (рис. 10.13), в которой используются последовательно соединенные катушки *1* и *2* на 220 В от универсального трансформатора. Магнитную индукцию в зазоре между катушками измеряют с помощью магнитного зонда. Можно изготовить и специальный индикатор, механизм которого показан на рисунке 10.14. Основной частью прибора является рамка с током *1* размером 4 × 4 см, содержащая примерно 100 витков провода и соединенная со стрелкой. Возвращающий момент создается спиральной пружиной *2*. Поместив индикатор между катушками, подают в них ток, вызывающий отклонение стрелки на 2—3 деления. Затем берут размагниченные сердечники и, поднося их к железным предметам, показывают, что они не притягивают их. Помещают сердечники в катушки с током и наблюдают возрастание магнитной индукции в 10—20 раз. Делают вывод: $\mu \gg 1$.

Важной особенностью ферромагнетиков является также зависимость их магнитной проницаемости μ от $|\vec{B}_0|$ (у пара- и диамагнетиков μ не зависит от $|\vec{B}_0|$).

В заключение в политехнических целях следует рассказать учащимся о широком применении ферромагнетиков в современной науке, электро- и радиотехнике, электронике.

Ферромагнетики с малым остаточным намагничиванием («мягкие») используются для изготовления сердечников трансформаторов, генераторов и т. д., а «жесткие» — для изготовления постоянных магнитов. Различие магнитных свойств «мягких» и «жестких» ферромагнетиков можно наглядно показать, сравнивая остаточный магнетизм конусообразных наконечников или ярма трансформатора с остаточным магнетизмом полосовых магнитов.

Желательно также познакомить учащихся с основными свой-

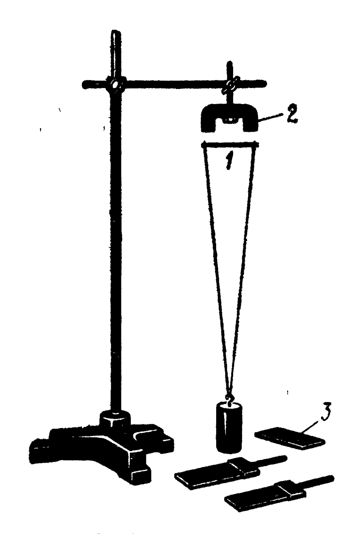


Рис. 10.15

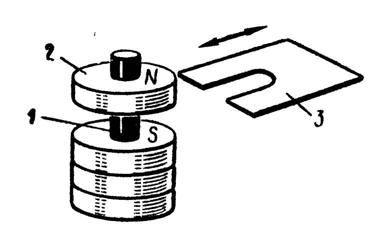


Рис. 10.16

ствами и применением новых магнитных материалов — ферритов[1] и показать «магнитную защиту». Для этого сначала при помощи проекции показывают, что магнитное поле внутри железного кольца незначительно, так как линии индукции концентрируются в железе. Кольцо помещают между стеклами и кладут на конденсор проекционного фонаря. Спектр получают на верхнем стекле, обращая внимание на то, что внутри кольца железные опилки располагаются в беспорядке [57, ч. 1, опыт 186].

После этого собирают установку (рис. 10.15). Железная проволочка *1* падает вниз, если между ней и магнитом *2* поместить лист железа *3*. Аналогичный опыт можно показать с керамическими магнитами (рис. 10.16). Надев на пластмассовый стержень *1* керамические магниты одноименными полюсами друг к другу, показывают, как верхний магнит *2* повисает в воздухе. Затем помещают между магнитами лист железа *3* и наблюдают, как магнит *2* падает вниз. При удалении листа магнит *2* снова поднимается вверх.

Из практических применений магнитов и электромагнитов могут быть в зависимости от оборудования и бюджета времени показаны: электромагнитный телефон, поляризованные реле, звонок и др. [см.: 57, т. I, изд. 2, опыты 39—43].

Интересные демонстрации, имеющие политехническую направленность, можно подготовить, используя книгу Г. И. Жерехова [59] (разведка железных руд магнитометром; магнитный микрометр; магнитная дефектоскопия, электромагнитный тральщик и др.). В связи с последней демонстрацией в целях военно-патриотического воспитания полезно рассказать учащимся о работах И. В. Курчатова во время Великой Отечественной войны на флоте [31].

Интересной темой для внеклассных занятий может быть изучение электромагнитных явлений в живой и неживой природе [77; 91; 92].

---

[1] См.: Бронников Н. Л. Демонстрация свойств ферритов. — Физика в школе, 1974, № 6, с. 64.

8. ЗАКОН АМПЕРА

Как уже было выяснено ранее, на движущиеся заряды, в том числе и на те, которые перемещаются в проводнике, действуют магнитные силы. Результирующая этих сил и есть та сила, с которой магнитное поле действует на проводник с током. Следующая задача заключается в том, чтобы найти количественное выражение этой силы (формулу Ампера). Формула Ампера может быть получена как экспериментальная или же выведена из формулы $M_{max} = |\vec{B}|\, IS$ с последующим подтверждением ее с помощью эксперимента.

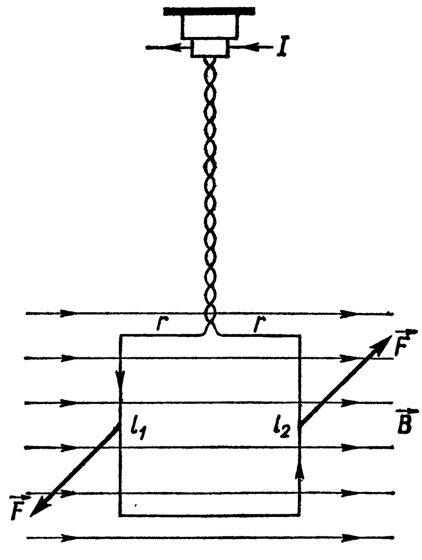


Рис. 10.17

Магнитное поле действует на стороны рамки с током (l_1, l_2—их длина) (рис. 10.17), создавая момент сил $M_{max} = |\vec{B}|\, IS$. Но $M = 2|\vec{F}|\, r$; $S = 2\, rl$. Следовательно, $2\, |\vec{F}|\, r = 2\, r\, |\vec{B}|\, Il$ или $|\vec{F}_{max}| = |\vec{B}|\, Il$.

Если вектор $\vec{B}$ не перпендикулярен проводнику l, то его можно разложить на две составляющие, одна из которых перпендикулярна, а другая параллельна проводнику. Последняя составляющая не создает момента силы. Поэтому $|\vec{F}| = |\vec{B}|\, Il \sin\alpha$, где α — угол между направлениями l и $\vec{B}$. Формула может быть проверена с помощью установки (рис. 10. 18). Основная часть прибора — рычаг AB,

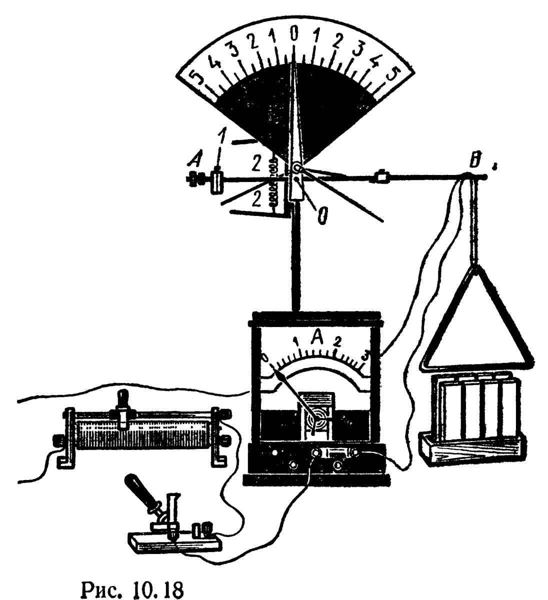


Рис. 10.18

ось вращения которого O. В горизонтальном положении рычаг устанавливается с помощью подвижного противовеса *1*. Возвращающий момент создается пружинами *2*, сила упругости которых и расстояние до оси O в основном и определяют чувствительность динамометра.

Ток в рамке измеряют демонстрационным амперметром. Перемещение рамки не должно превышать 3 см, так как поле между полюсами постоянных магнитов неоднородно.

Зависимость модуля силы $\vec{F}$ от активной длины проводника l обнаруживают, изменяя число магнитов. Располагая рамку чуть выше магнитов и поворачивая их, показывают, что с уменьшением угла α модуль силы $\vec{F}$ уменьшается и становится равным нулю, когда проводник располагается вдоль линий магнитной индукции. Опыты с достаточной для демонстрационных целей точностью подтверждают формулу Ампера.

После этого повторяют известное учащимся из курса физики VII класса правило левой руки и закрепляют его путем упражнений, рассмотрев также случаи, когда направление тока совпадает с вектором $\vec{B}$ и противоположно ему.

Здесь наглядно проявляется отличие магнитных сил, действующих на ток, от центральных (электростатических и гравитационных): магнитная сила зависит от направления тока. Следует отметить, что правило левой руки — это всего лишь мнемоническое правило, удобное для определения направления силы Ампера. Возможны и другие правила. Но все они должны отражать важнейшую особенность магнитных сил, действующих на проводник с током: эти силы перпендикулярны как направлению вектора $\vec{B}$, так и направлению тока (точнее, скорости зарядов $\vec{v}$).

Для закрепления изученного материала проводят фронтальную лабораторную работу «Наблюдение взаимодействия магнита и тока» [2; 81]. Ряд опытов учащиеся могут выполнить и в домашних условиях. Наконец, в конце изучения данного раздела необходимо повторить и углубить известный учащимся из курса физики VII класса важный политехнический материал об электродвигателях. Следует рассмотреть с учащимися поворот рамки с током в магнитном поле и затем продемонстрировать сначала устройство и действие модели простейшего коллекторного двигателя, а затем близкую к техническому двигателю модель, обратив особое внимание учащихся на якорь, электромагнит, коллектор и щетки. Можно также рассказать о способе включения обмотки возбуждения (последовательном, параллельном, смешанном).

Желательно также показать в собранном и разобранном виде технический электродвигатель постоянного тока, например стартер автомобиля, и познакомить учащихся с его основными паспортными данными.

Номинальное напряжение	12 В
Число полюсов	4
Возбуждение (обмотка)	Смешанное
Сила тока при холостом ходе	Не более 35 А
« « при максимальной мощности	260 А
« « в заторможенном состоянии	500 А
Скорость вращения якоря при холостом ходе	До 5000 об/мин
Скорость вращения якоря при максимальной мощности.	До 1840 об/мин
Крутящий момент	До 7,4 Н · м

Эти данные должны быть использованы для более глубокого изучения явлений, происходящих в электродвигателе при разных режимах его работы. В тех же целях на их основе могут быть составлены физические задачи. Желательна также экскурсия в гараж или ремонтную мастерскую для ознакомления с электрооборудованием автомобиля или трактора, в частности с устройством стартера [91; 77].

9. СИЛА ЛОРЕНЦА

Цель урока — дать учащимся понятие о количественном выражении силы, с которой магнитное поле действует на движущийся в нем электрический заряд. Вывод формулы $|\vec{F}_л| = q\ |\vec{v}_1|\ |\vec{B}| \sin\alpha$ на основе формулы Ампера имеется в учебном пособии по физике для IX класса[1].

При анализе данной формулы учителю следует иметь в виду ее запись в векторной форме $\vec{F}_л = q\ [\vec{v}\vec{B}]$, согласно которой векторы $\vec{F}_л$, $\vec{v}$ и $\vec{B}$ образуют правовинтовую систему. Учащимся этот факт объясняют на конкретных примерах, пользуясь правилом левой руки. В результате учащиеся должны усвоить: а) что сила Лоренца $\vec{F}_л$ перпендикулярна векторам $\vec{B}$ и $\vec{v}$; б) что при $v = 0$ $F_л = 0$. Магнитное поле не действует на покоящиеся заряды, что уже было показано на первом уроке по данной теме; в) что сила $F_л = 0$, если заряд движется вдоль линий магнитной индукции $\vec{B}$ (ранее это было выяснено на примере действия поля на проводник с током); г) что скорость $\vec{v}$ измеряется в той же системе отсчета, в которой измеряется сила $\vec{F}_л$ и магнитная индукция $\vec{B}$.

Действие магнитного поля на движущиеся свободно (в вакууме) заряды следует показать, поднося к экрану электроннолучевой трубки осциллографа дугообразный магнит и перемещая по желанию луч в ту или иную сторону. Желательно также показать отклонение в магнитном поле ионов электролита. Для опыта в прозрачный кристаллизатор (рис. 10.19) помещают кольцевой *1* и центральный *2* электроды и кладут под кристаллизатор несколько керамических магнитов.

---

[1] Заметим, что возможно и такое построение учебного материала, когда вначале дается понятие о силе Лоренца, а затем о силе Ампера.

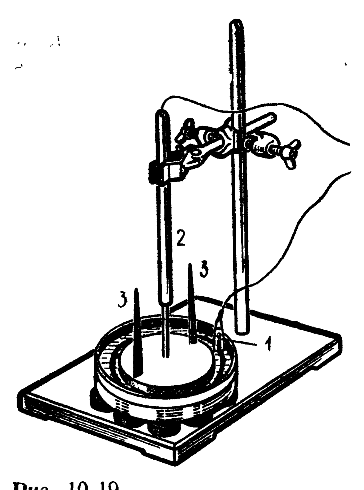


Рис. 10.19

В кристаллизатор наливают электролит (например, водный раствор медного купороса), поверхность которого посыпают каким-либо порошком (ликоподий, пробковая пыль и т. п.) или же помещают поплавок *3*. В теневом проецировании хорошо заметно перемещение порошка под действием ионов в направлении, перпендикулярном $\vec{B}$ и $\vec{v}$. Силы, действующие на ионы разных знаков, одинаково направлены, так как ионы движутся в противоположные стороны. В сосуде возникают конвекционные потоки.

Интересна также демонстрация гашения электрической дуги в магнитном поле. Для этого концы углей помещают между полюсами электромагнита и получают дугу. При включении электромагнита дуга гаснет, так как движущиеся в плазме заряды выталкиваются магнитным полем.

Особых пояснений требует вопрос о том, что сила Лоренца не совершает работы по перемещению частиц и, следовательно, их кинетическая энергия и модуль скорости не изменяются.

Это положение сначала следует пояснить на простейшем примере движения положительно заряженной частицы с некоторой скоростью $\vec{v}$ в направлении, перпендикулярном линиям магнитной индукции $\vec{B}$ однородного магнитного поля. В данном случае скорость $\vec{v}$ и сила Лоренца $\vec{F}_л$ по модулю являются величинами постоянными. Направление же силы все время изменяется, оставаясь перпендикулярным векторам $\vec{v}$ и $\vec{B}$. Этот факт поясняется с помощью правила левой руки для различных положений частицы. Таким образом, действие силы Лоренца аналогично, например, действию известной учащимся из механики силы упругости нити, заставляющей вращаться по окружности с постоянной по модулю скоростью материальную точку.

Сила $\vec{F}_л$ все время перпендикулярна элементарному перемещению частицы $\vec{\Delta s}$ и поэтому работы не совершает:

$$A = |\vec{F}_л| \cdot |\vec{\Delta s}| \cos 90^\circ = 0.$$

Одним из практически важных случаев является движение в магнитном поле зарядов в обмотке якоря электродвигателя[1].

[1] Данный вопрос обстоятельно изложен в статье Н. Н. Малова «О работе силы Лоренца». — Физика в школе, 1978, № 1, с. 83.

Для закрепления материала следует решить задачи, приведенные в учебнике [2, упр. 14]. Задачу № 4 полезно сначала решить в следующем варианте.

По двум проводникам, лежащим в одной плоскости (рис. 10.20), пропускают токи I_1 и I_2. Как расположатся проводники друг относительно друга, если проводник *2* может перемещаться, а проводник *1* закреплен?

Решение. Выделим на проводнике *2* элемент тока $I_2\Delta l_1$ и по правилу буравчика определим направление вектора $\vec{B}_1$ в данном месте магнитного поля, созданного током I_1. По правилу левой руки определим направление силы $\vec{F}_1$, действующей на элемент тока $I_2\Delta l_1$.

Если рассмотреть действие магнитного поля на элемент $I_2\Delta l_2$, расположенный по другую сторону проводника *1*, аналогичным образом найдем, что на элемент $I_2\Delta l_2$ действует сила $\vec{F}_2$, противоположная $\vec{F}_1$ по направлению. Силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ будут вращать проводник *2*, стремясь повернуть его так, чтобы токи I_1 и I_2 стали параллельными.

Полезно также решение следующих задач:

1. На рисунке 10.21 показано отклонение электронного пучка в магнитном поле. Определить направление линий магнитной индукции.

2. На рисунке 10.22 показан подвижный металлический диск, помещенный между полюсами магнита. Нижняя часть диска опущена в электролит. В каком направлении и почему будет вращаться диск, если электролит соединить с положительным, а ось диска — с отрицательным полюсом источника тока?

Последнюю задачу полезно поставить как экспериментальную. В ознакомительном плане как решение соответствующих задач

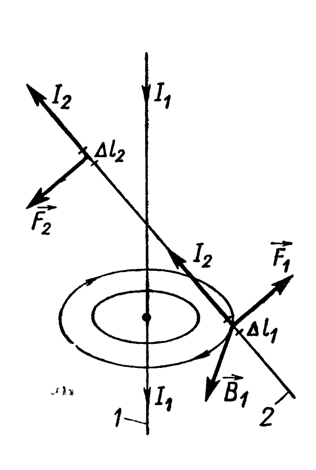


Рис. 10.20

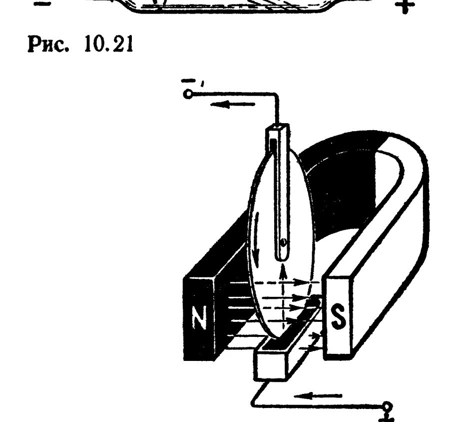


Рис. 10.21

Рис. 10.22

полезно рассмотреть вопрос об определении заряда электрона и циклическом ускорителе [2, § 94].

На заключительном уроке разбирают и обобщают основные, особенно недостаточно усвоенные учащимися вопросы темы, показывают их практическое и научное значение. Желательно, чтобы ученики к этому уроку подготовили 2—3 кратких сообщения об истории учения о магнетизме, использовании магнитных явлений в народном хозяйстве, обороне страны и т. д. [38; 62; 91; 92][1]. В том числе полезно подробнее рассказать о различных магнитных аномалиях и о магнитном поле Земли, его влиянии на потоки заряженных космических частиц [46; 62].

В том случае, если будет проводиться контрольная работа, в нее можно включить задачи из пособий [2, упр. 14, № 1, 2, 5; 27, № 683—688, 695—697].

ГЛАВА 11

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

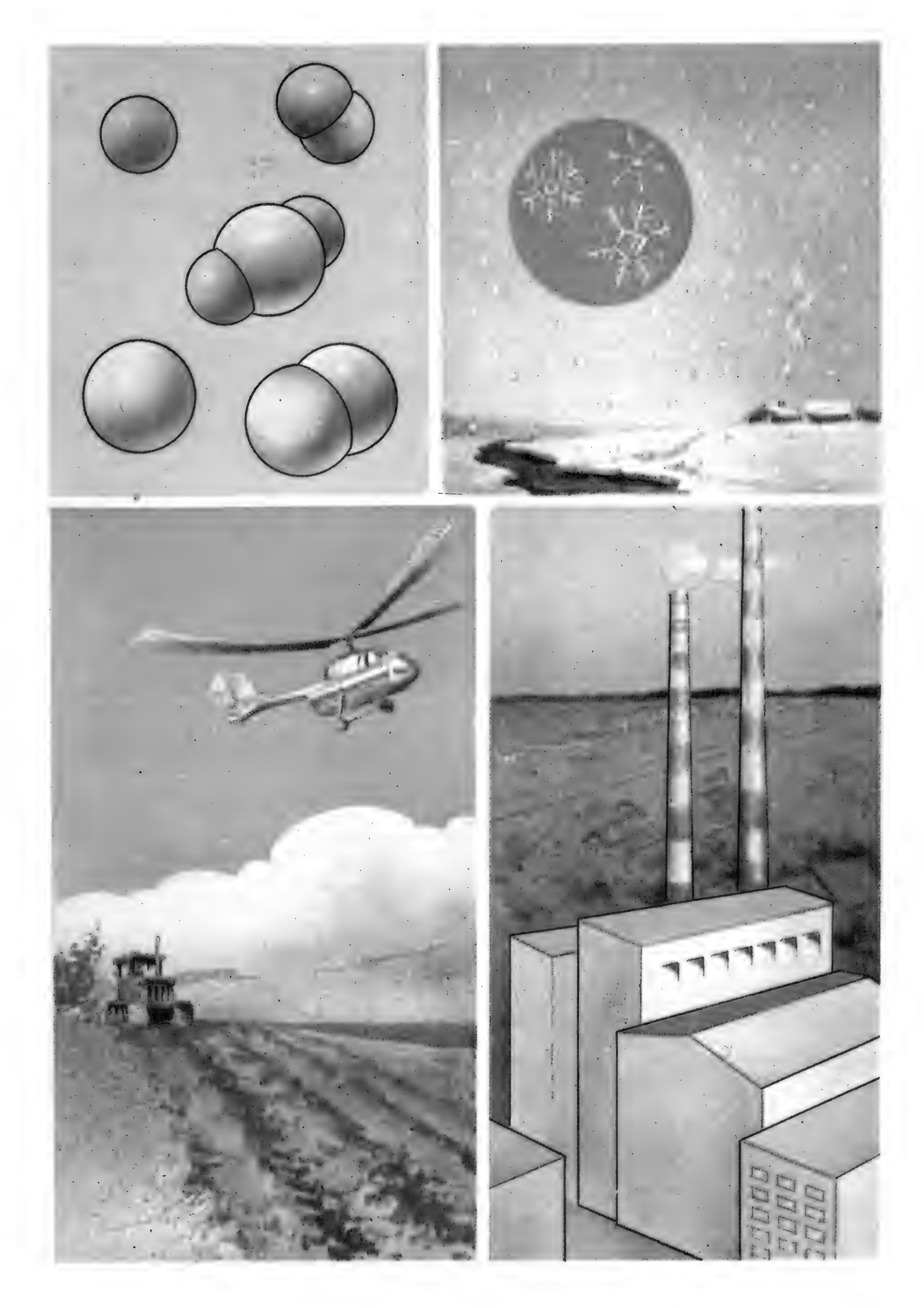
В данной теме изучаются основные опытные факты по электромагнитной индукции, установленные Фарадеем, и закон электромагнитной индукции.

Закон электромагнитной индукции — один из важнейших фундаментальных законов физики, которым объясняются многочисленные явления в неживой и живой природе и который поэтому лежит в основе многих разделов современной электро- и радиотехники и их практических приложений.

Содержание темы видно из следующего примерного поурочного планирования:

1-й урок.	Открытие электромагнитной индукции. Опыты Фарадея.
2-й и 3-й уроки.	Магнитный поток. Направление индукционного тока. Правило Ленца.
4-й урок.	Закон электромагнитной индукции. Единицы магнитной индукции и магнитного потока.
5-й урок.	Вихревое электрическое поле.
6-й урок.	Упражнения.
7-й урок.	ЭДС индукции в движущихся проводниках.
8-й урок.	Самоиндукция. Индуктивность.
9-й урок.	Лабораторная работа «Изучение явлений электромагнитной индукции или самоиндукции».
10-й урок.	Энергия магнитного поля тока.
11-й урок.	Упражнения.
12-й урок.	Повторение и обобщение темы или контрольная работа.

[1] Можно также рекомендовать книгу: Шур Я. И. Верный путеводитель. М., 1956.





1. ОТКРЫТИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ. ОПЫТЫ ФАРАДЕЯ

Приступая к изучению данной темы, вначале следует восстановить в памяти учащихся сведения об электромагнитной индукции, известные им из курса физики VII класса. С этой целью можно повторить опыты, например, по получению индукционного тока в катушке с помощью движущегося магнита.

Для того чтобы показать учащимся научную и практическую важность этого великого открытия и познакомить их с развитием физических идей, сыгравших такую большую роль в естествознании, полезно познакомить учащихся с жизнью и деятельностью Фарадея [38—40].

С именем Фарадея связан один из переломных этапов классической физики. По курсу истории VIII класса учащиеся знают о промышленном перевороте в Англии, о превращении ее в середине XIX в. в «мастерскую мира». На полную мощность работает «его величество пар», развивается и совершенствуется металлургия, различные виды транспорта и т. д.

Достижения науки все в большей мере используются в практических целях. Показательно, например, открытие в 1800 г. в Англии Королевского института «для распространения научных знаний и содействия повсеместному введению полезных механических изобретений и улучшений, а также для доказательства посредством естественнонаучных докладов и экспериментов возможности применения научных данных в повседневной жизни» [48, с. 50]. В этом институте в 1813 г. в скромной должности ассистента начал работать Фарадей.

Майкл Фарадей, как и многие другие передовые естествоиспытатели его времени, стихийно стоял на позициях материализма. Он писал: «Материя присутствует везде и нет промежуточного пространства, не занятого ею»[1].

В своих исследованиях Фарадей руководствовался идеей о взаимосвязи и единстве явлений, о взаимопревращаемости, как он выражался, «сил природы».

В этих положениях в неявном виде угадывается закон сохранения и превращения энергии.

С этих позиций вполне понятна поставленная Фарадеем в 1821 г. и решенная через 10 лет задача: «Превратить магнетизм в электричество».

Нередко, рассказывая об открытии Фарадеем электромагнитной индукции, ученики говорят примерно следующее: «10 лет работал Фарадей над этой проблемой, но вот однажды, опустив в катушку магнит, обнаружил, что гальванометр показывает ток». Все это кажется таким простым и легким.

---

[1] Фарадей М. Экспериментальные исследования по электричеству. М., 1951, т. II, с. 400—401.

На самом деле все обстояло иначе. В изучении магнетизма делались только первые шаги.

В 1820 г. Эрстед обнаружил поворот под действием тока магнитной стрелки. В этом же году Араго открыл «намагничивание током», а Ампер обнаружил «взаимодействие токов». Взаимосвязь электричества и магнетизма была очевидной, и идея получения электричества за счет магнетизма «носилась» в воздухе. Эту задачу пытался решить ряд ученых, в том числе Ампер и Колладон, но безуспешно [2, с. 223].

Учащихся нужно познакомить с идеей первоначального опыта Фарадея по получению индукционного тока в замкнутой катушке при включении и выключении тока во второй катушке, неподвижной относительно первой. При этом поучительно обнаружить индукционный ток с помощью гальваноскопа, как это делал Фарадей. Незначительность эффекта даст учащимся некоторое представление об условиях, в которых было сделано открытие (Фарадею приходилось самому изготавливать даже изолированную проволоку). Затем, следуя истории открытия и логике рассуждений Фарадея, приведенных в учебнике, нужно еще раз пронаблюдать возникновение индукционного тока при перемещении катушек друг относительно друга.

Можно также показать, как Фарадей добивался усиления эффекта явления, сближая и удаляя проводники в такт колебаниям стрелки.

В результате учащиеся должны усвоить важнейший факт: переменное магнитное поле способно порождать электрическое поле. В течение месяца Фарадей исследовал все важнейшие стороны электромагнитной индукции и дал оригинальную теорию, согласно которой вокруг магнита и проводника с током существует особое состояние материи, которое обнаруживается в случае его изменения.

Позднее на основе представлений о магнитных силовых линиях Фарадей сформулировал правило, согласно которому в замкнутом контуре возникает ток при изменении в нем числа силовых линий.

Время показало, сколь велико значение открытия Фарадея. Повторяя слова Гельмгольца, можно с полным правом сказать, что до тех пор «пока люди будут пользоваться благами электричества, они всегда будут с благодарностью вспоминать имя Фарадея» [38, т. II, с. 439].

Для более полного ознакомления учащихся с жизнью, деятельностью, а также идеями Фарадея и его временем желательно провести физический вечер.

2. НАПРАВЛЕНИЕ ИНДУКЦИОННОГО ТОКА. ПРАВИЛО ЛЕНЦА

Исследовав в 1831 г. все важнейшие стороны электромагнитной индукции, Фарадей установил несколько правил для определения направления индукционного тока в различных частных случаях,

однако общее правило ему найти не удалось. Оно было установлено позднее, в 1834 г., петербургским академиком Эмилем Христиановичем Ленцем (1804—1865) и носит поэтому его имя.

Для учителя заметим, что сам Э. Х. Ленц это правило сформулировал так: «Если металлический проводник движется поблизости от гальванического тока или магнита, то в нем возбуждается гальванический ток такого направления, что [если бы данный] проводник был неподвижным, то ток мог бы обусловить его перемещение в противоположную сторону; при этом предполагается, что покоящийся проводник может перемещаться только в направлении движения или в противоположном направлении»[1].

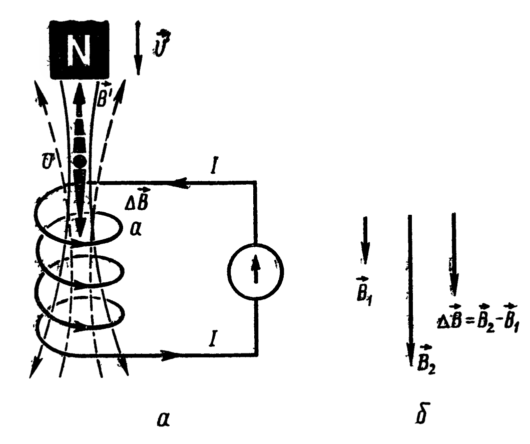


Рис. 11.1

Приступая к изучению данной темы, вначале следует повторить известные учащимся из курса физики VII класса качественные опыты по получению индукционного тока в катушке, а также в проводнике, движущемся в магнитном поле.

Затем ставят задачу нахождения правила для определения направления индукционного тока. Для этого сначала проводят вводный опыт. Берут 1,5—2 м провода, свертывают из него несколько витков, концы которых присоединяют к демонстрационному гальванометру (рис. 11.1, *а*). Затем в данную цепь через дополнительное сопротивление включают источник постоянного тока и устанавливают, в какую сторону отклоняется стрелка в зависимости от направления тока.

После этого приступают к выполнению и анализу основного эксперимента. Вдвигают в виток магнит и по отклонению стрелки гальванометра определяют направление индукционного тока в витке. Обращают внимание на то, что магнитный поток, пронизывающий контур витка, изменялся, и предлагают учащимся связать изменение этого потока с направлением индукционного тока I_i.

Заметим, что в общем случае магнитный поток $\Phi = |\vec{B}|\, S \cos\alpha$ может изменяться в результате изменения магнитной индукции $\vec{B}$, площади витка S, угла α или же за счет изменения каких-либо двух или трех указанных величин одновременно. В данном случае

---

[1] Цитируется по кн.: Спасский Б. И. История физики. М., 1963, ч. 1, с. 291—292.

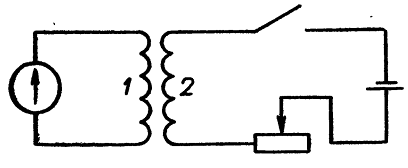


Рис. 11.2

поток Ф изменялся в результате изменения магнитной индукции $\vec{B}$. По направлению тока I_i одним из известных учащимся способов определяют направление вектора магнитной индукции $\vec{B'}$ его поля, например в центре витка, и изменение в той же точке вектора $\vec{B}$ магнитного поля, созданного магнитом.

Вначале, когда магнит был от катушки сравнительно далеко, магнитная индукция $\vec{B_1}$ была невелика (рис. 11.1, *б*). При приближении магнита индукция увеличилась и, допустим, стала равной $\vec{B_2}$. Изменение магнитной индукции $\Delta\vec{B} = \vec{B_2} - \vec{B_1}$. Как видно из рисунка 11.1, *а*, вектор $\vec{B'}$ направлен противоположно вектору $\Delta\vec{B}$.

Опыт и аналогичные рассуждения следует повторить для какого-либо иного случая, например для движения магнита вверх.

В любом случае окажется, что вектор $\vec{B'}$ противоположен по направлению вектору $\Delta\vec{B}$. Следовательно, индукционный ток имеет такое направление, что созданный им магнитный поток $\Phi' = B'S$ препятствует изменению магнитного потока $\Delta\Phi = \Delta BS$, которое его вызвало.

Вариантом или дополнительным экспериментом может служить опыт, схема которого показана на рисунке 11.2. Индукционный ток в катушке *1* получают, включая и выключая ток в катушке *2* или изменяя его с помощью реостата. При этом рассуждения для вывода правила Ленца остаются примерно такими же. Но в этом случае вопрос об изменении вектора $\vec{B}$ в избранной точке более очевиден.

В заключение нужно сообщить учащимся, что правило Ленца является следствием закона сохранения энергии и поэтому может быть получено путем следующих рассуждений.

Поднятый на высоту h над витком магнит обладает потенциальной энергией $W_p = m\,|\vec{g}|\,h$. Если нет индукционных токов (виток не замкнут), то $m\,|\vec{g}|\,h = \frac{mv^2}{2}$, где $\vec{v}$ — скорость магнита на уровне витка. Потенциальная энергия полностью переходит в кинетическую. Если же виток замкнут, то в нем возникнет индукционный ток и часть механической энергии перейдет в энергию электрическую. Скорость падения магнита должна уменьшиться. Следовательно, магнит должен отталкиваться витком и на стороне витка, обращенной к магниту, возникнет одноименный (северный) полюс. Таким образом, мы приходим к тому же правилу Ленца.

По третьему закону Ньютона на виток будет действовать сила со стороны магнитного поля магнита, но направленная противополож-

но. Это наглядно демонстрируется с помощью прибора для демонстрации правила Ленца.

3. ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Изложение материала может быть построено так, что сначала учащимся сообщают формулу $\mathscr{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, а затем ее поясняют на опытах, или же, наоборот, вначале на опытах качественно устанавливают зависимость ЭДС индукции от скорости изменения магнитного потока, а затем сообщают формулу.

Существование индукционного электрического тока в замкнутых проводниках говорит о возникновении в них благодаря изменению магнитного поля некоторой сторонней ЭДС, которая играет ту же роль, что и сторонняя ЭДС батареи в цепи. Очевидно, эта ЭДС может быть различной: и большой и малой. Дальнейшая задача заключается в том, чтобы найти количественный закон для определения ЭДС индукции.

Вдвигая в катушку (см. рис. 11.1, *а*) один, а затем несколько магнитов, обнаруживают, что индукционный ток во втором случае больше, чем в первом. Объясняют это тем, что при $\Delta t \approx \text{const}$ магнитный поток во втором случае изменялся значительней, чем в первом.

После этого перемещают магнит сначала медленно, а затем быстро и замечают, что сила индукционного тока тем больше, чем меньше время, за которое изменяется магнитный поток.

Следовательно, $I_i \sim \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ и на движущиеся в проводнике заряды действуют сторонние силы. Работа этих сил по замкнутому пути (витку) так же, как и работа, например сторонних сил в замкнутой цепи с гальваническим элементом, определяет электродвижущую силу. Для указания происхождения этой силы ее называют ЭДС индукции $\mathscr{E}_i$. По закону Ома для замкнутой цепи $I_i = \frac{\mathscr{E}_i}{R}$. Поэтому $\mathscr{E}_i \sim \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

Далее учащимся говорят, что так как единица для измерения магнитного потока еще не установлена, то коэффициент пропорциональности можно положить равным единице, и мы приходим к следующей формулировке закона: ЭДС индукции в замкнутом контуре равна по модулю скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром: $|\mathscr{E}_i| = \left|\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\right|$.

В заключение учащимся объясняют, что в правой части формулы должен стоять знак «минус», т. е. $\mathscr{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

На основании формулы $|\mathscr{E}_i| = \left|\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\right|$ в СИ устанавливают единицу магнитного потока в е б е р (Вб): 1 Вб = 1 В · 1 с.

4. ВИХРЕВОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Анализируя опыты (см. рис. 11.1 и 11.4), следует выяснить, какие силы приводят в движение электрические заряды в проводниках. Учащимся известно, что на электрические заряды могут действовать электрические и магнитные силы. Последние в том случае, если заряды движутся, как, например, при наличии тока в проводниках. Поскольку же в начале опыта тока в проводниках не было, привести электрические заряды в упорядоченное движение могло только электрическое поле. Оно возникло в пространстве, где находились проводники, в результате изменения магнитного поля. Существование тока в витках катушки говорит о том, что силовые линии индукционного электрического поля, в отличие от поля электростатического, замкнуты. Пользуясь правилом Ленца, можно определить направление напряженности $\vec{E}$ в каждой точке поля.

Для простоты рассмотрим отдельно виток *a* (рис. 11.1 и 11.3), в котором возник индукционный ток. Изобразим графически изменение вектора магнитной индукции $\Delta\vec{B}$ внешнего поля и противоположно направленный вектор $\vec{B}'$ магнитного поля индукционного тока.

Стрелки, указывающие направление тока в витке *a*, одновременно указывают и направление силовых линий электрического поля. Направление же напряженности стороннего электрического поля $\vec{E}$ в любой точке совпадает с касательной к силовой линии.

Из рисунка 11.3 также следует, что если известно изменение вектора магнитной индукции, то направление напряженности вихревого электрического поля $\vec{E}$ в любой точке можно определить по правилу левого винта (рис. 11.4). Это — следствие правила Ленца

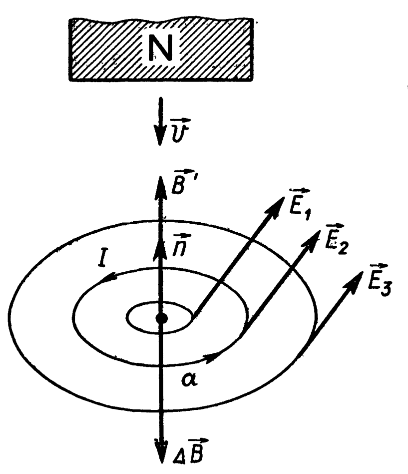


Рис. 11.3

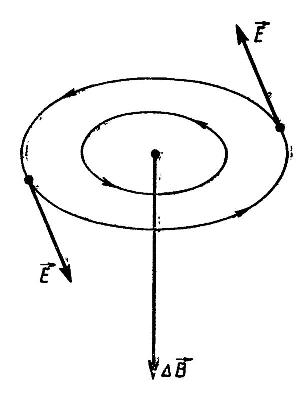


Рис. 11.4

или иная, эквивалентная ему, формулировка, позволяющая определять направление векторов $\Delta\vec{B}$ и $\vec{E}$ в избранной точке поля.

Для сравнения и сопоставления этих понятий полезно обратить внимание учащихся на то, что направление вектора $\vec{B}$ собственного поля, созданного током в центре витка, связано с направлением этого тока (силовых линий электрического поля напряженностью $\vec{E}$) правилом правого винта.

Для индукционного же тока направление вектора $\vec{E}$ связывается с направлением *изменения* вектора магнитной индукции $\Delta\vec{B}$, притом внешнего магнитного поля, правилом левого винта. Это и определяет знак «минус» в формуле $\mathscr{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$. Понимание этого обстоятельства важно для решения задач и последующего изучения материала, в том числе об электромагнитных колебаниях и волнах в X классе.

Далее следует подчеркнуть, что проводящий контур является всего лишь индикатором индуцированного электрического поля, которое может существовать и без него, например в вакууме.

В качестве одного из применений данного явления рассматривают принцип действия бетатрона.

Переменное магнитное поле электромагнита создает вихревое электрическое поле, в которое помещают кольцевую вакуумную трубку — «электронную пушку». От «электронной пушки» электроны движутся по силовым линиям вихревого электрического поля со все увеличивающейся скоростью. Электромагниты с особой конфигурацией полюсов, расположенные вдоль вакуумной трубки, обеспечивают движение электронов по круговым орбитам. Бетатрон, в отличие от циклотрона, не требует постоянства частоты обращения электронов и позволяет получить электроны с энергией до 500 МэВ.

В заключение полезно подвести итог изученному, повторить и обобщить важнейшие сведения об электрическом и магнитном полях, обратив внимание учащихся на следующее:

1. Электрическое поле, например, точечных зарядов потенциально. Его силовой характеристикой является вектор напряженности $\vec{E}$. Силовые линии поля начинаются и кончаются на электрических зарядах или уходят в бесконечность.

2. Магнитное поле непотенциально. Его силовой характеристикой является вектор магнитной индукции $\vec{B}$. Магнитных зарядов нет. Линии магнитной индукции, например «прямого» тока, замкнуты или уходят в бесконечность, как, например, некоторые линии у полюсов магнитов.

3. Изменяющееся магнитное поле вызывает появление электрического поля, которое и перемещает ранее неподвижные заряды по замкнутой цепи (магнитная сила — сила Лоренца $|\vec{F}_л| =$

4. Будет ли возникать индукционный ток в замкнутой рамке, перемещающейся равномерно и прямолинейно в однородном магнитном поле? перемещающейся прямолинейно и ускоренно? вращающейся в магнитном поле?

Ответ. В первых двух случаях тока в рамке не будет, так как $\Delta\Phi = 0$. В третьем случае ток возникает, так как $\Delta\Phi \neq 0$, если линии магнитной индукции $\vec{B}$ непараллельны плоскости рамки и неперпендикулярны к ней во все время вращения.

В связи с ответом на эти вопросы нужно обратить внимание учащихся на то, что опыты с рамкой и магнитом по получению индукционного тока удались потому, что поле было неоднородным.

Следует также обратить внимание на то, что при повороте рамки, например якоря генератора, в однородном поле изменение потока Φ согласно формуле $\Phi = |\vec{B}|\, S \cos\alpha$ вызвано изменением угла α.

6. ЭДС ИНДУКЦИИ В ДВИЖУЩИХСЯ ПРОВОДНИКАХ

Изложение материала можно начать с рассмотрения изолированного проводника, в котором при его движении в однородном магнитном поле происходит перераспределение свободных зарядов под действием силы Лоренца, или же вначале продолжить изучение причин возникновения индукционного тока в замкнутом контуре. Второй путь представляется предпочтительным, так как при постановке опытов по обнаружению ЭДС индукции в движущихся проводниках приходится фактически пользоваться замкнутой цепью. А для этого случая, вообще говоря, ЭДС индукции $\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ обусловливается изменением магнитного потока $\Phi = |\vec{B}|\, S \cos\alpha$ в результате изменения $|\vec{B}|$, S и α. Выше были рассмотрены случаи, когда изменение Φ вызывалось изменением только магнитной индукции. Рассмотрим теперь случай, когда изменяется площадь контура S в постоянном магнитном поле.

Постановку соответствующего опыта в порядке решения творческой экспериментальной задачи могут предложить сами учащиеся. Для опыта можно использовать один или несколько витков провода (рис. 11.9, *а*), концы которого подключены к гальванометру. Поместив виток около полюса сильного магнита, изменяют рукой площадь поверхности, ограниченную витком, и, следовательно, магнитный поток Φ через нее. При этом гальванометр покажет возникновение индукционного тока, направление которого определяют по правилу Ленца.

Здесь же обращают внимание на отличие данного опыта по электромагнитной индукции от всех рассмотренных ранее, где имело место изменение магнитного поля (вектора $\vec{B}$) внутри контура и, следовательно, возникало вихревое электрическое поле.

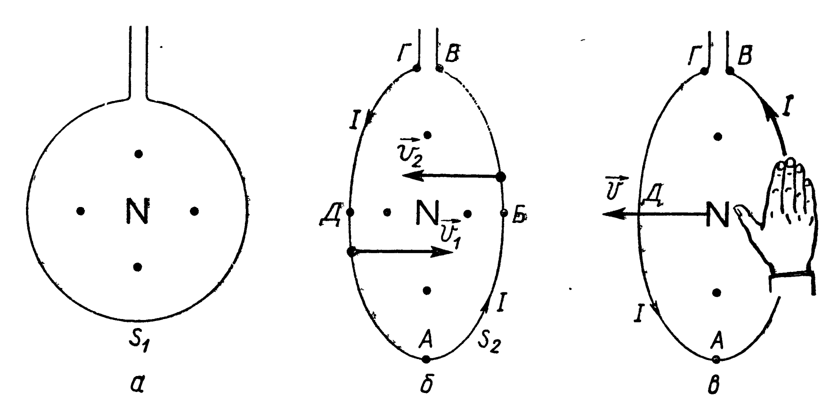


Рис. 11.9

В данном же случае магнитное поле не изменяется, поэтому вихревое электрическое поле не возникает. Следовательно, на заряды действует магнитная сила Лоренца, обусловленная их перемещением вместе с проводником.

Зная направление движения свободных зарядов вместе с проводником, например вправо на участке контура *АДГ* (рис. 11.9, *б*), по правилу левой руки можно определить направление силы Лоренца и, следовательно, тока *I*. Аналогично учащиеся должны самостоятельно определить направление тока на участке *АБВ*.

По усмотрению учителя и в зависимости от знаний учащихся из курса физики VII класса может быть введено и правило правой руки для определения направления индукционного тока в движущемся проводнике (рис. 11.9, *в*) (учитывая его широкое распространение на практике). Однако в этом случае оба правила (и правой и левой руки) должны быть прочно закреплены путем упражнений, иначе учащиеся путают их. В частности, полезны упражнения с установкой, показанной на рисунке 11.10. Изменяя положение магнита и направление движения проводника, рассматривают различные случаи, в том числе и такой, когда проводник движется вдоль линий индукции, не пересекая их. Гальванометр в данном опыте желательно использовать с усилителем.

Анализируя опыт, необходимо обратить внимание на следующее. В любой замкнутой цепи индукционный ток обусловлен изменением магнитного потока Ф. Но ЭДС в данном случае возникает только в движущемся «активном» проводнике. Участок проводника, в котором возникает ЭДС, является гене-

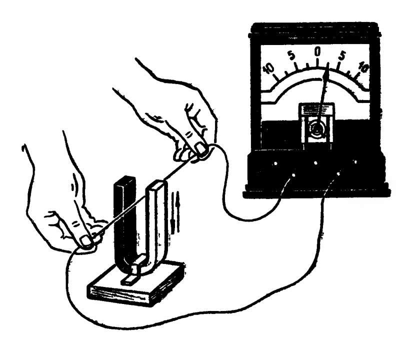


Рис. 11.10

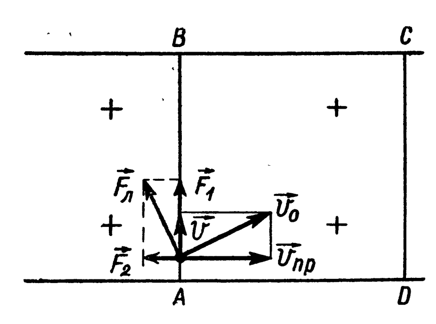


Рис. 11.11

ратором электрической энергии и выполняет такую же роль, как, например, гальванический элемент в цепи.

Найдем теперь количественное выражение для ЭДС индукции в движущемся проводнике.

Наряду с изложенным в учебнике, возможен следующий вариант объяснения данного материала. Рассмотрим контур $ABCD$ (рис. 11.11), лежащий в плоскости, которая перпендикулярна линиям магнитной индукции однородного поля. Допустим, что часть контура AB длиной l равномерно перемещается вправо со скоростью $\vec{v}_{пр}$.

Под действием силы Лоренца свободные заряды проводника придут в движение и станут перемещаться вдоль проводника от A к B со скоростью $\vec{v}$ (доли миллиметра в секунду). Полную скорость заряда $\vec{v}_0$ найдем по правилу параллелограмма, а полную силу Лоренца (ее модуль) — по формуле $|\vec{F}_л| = q\,|\vec{v}_0|\cdot|\vec{B}|$. Составляющая этой силы $\vec{F}_1$ перемещает заряды вдоль проводника от A к B, а составляющая $\vec{F}_2$, как легко определить по правилу левой руки, направлена против движения проводника и обусловливает возникновение силы Ампера, действующей на проводник с индукционным током. Против этой силы и совершают работу внешние силы. В результате перемещения зарядов вдоль проводника AB на одном из его концов появляется избыток электронов, а на другом — избыток положительных зарядов. Поэтому между концами проводника AB возникает разность потенциалов, т. е. он становится источником ЭДС. Вычислим эту ЭДС.

При перемещении электронов в «источнике» от одного конца проводника до другого, т. е. на расстояние l, совершается работа

$$A = |\vec{F}_1|\,l = q\,|\vec{v}_{пр}|\cdot|\vec{B}|\,l.$$

ЭДС же равна, как мы знаем, отношению работы к значению заряда. Следовательно,

$$\mathscr{E} = \frac{A}{q} = |\vec{v}_{пр}|\cdot|\vec{B}|\,l.$$

Такая ЭДС и возникает в любом проводнике, когда он движется в магнитном поле так, что его скорость перпендикулярна и собственной длине и магнитной индукции поля, или, короче, когда он пересекает линии индукции магнитного поля. Проводник становится источником ЭДС.

Для закрепления материала полезно решение задач следующего типа:

Найти разность потенциалов, возникающую на концах крыльев сверхзвукового пассажирского самолета при горизонтальном полете со скоростью 2500 км/ч. Размах крыльев самолета $l = 28{,}8$ м. Модуль вертикальной составляющей вектора магнитной индукции магнитного поля Земли $|\vec{B}_в| = 5 \cdot 10^{-5}$ Тл.

Решение. Разность потенциалов находим по формуле $\mathscr{E}_i = |\vec{v}| \cdot |\vec{B}|\, l$. Подставляя данные задачи, получим: $\mathscr{E}_i = 1$ В.

Далее в политехнических целях следует уделить внимание генераторам электрического тока. Для этого учащиеся должны прежде всего повторить соответствующие сведения из учебника «Физика-6—7» об устройстве технических генераторов. Затем эти сведения углубляются на основе материала об электромагнитной индукции, изученного в IX классе.

Изменение магнитного потока $\Phi = |\vec{B}|\, S \cos \alpha$ через поверхность, ограниченную витками, в которых индуцируется ЭДС, происходит в результате изменения угла α между векторами $\vec{B}$ и $\vec{n}$. Угол α изменяется вследствие вращения ротора генератора (вне зависимости от того, вращается ли якорь с нанесенной на него обмоткой или же электромагниты с катушками возбуждения). Величины же S и $\vec{B}$ (при заданном режиме работы генератора) остаются неизменными.

Для объяснения работы генератора применим формулу

$$A = I_i\, |\vec{B}|\, ld = I_i\, |\vec{B}|\, l\, |\vec{v}_{пр}|\, t,$$

где $\vec{v}_{пр}$ — скорость перемещения проводника в магнитном поле.

Из формулы видно, что для приведения в движение генератора будет затрачиваться тем бо́льшая работа, чем больше индукция $\vec{B}$ магнитного поля. В промышленных генераторах магнитное поле создается электромагнитами ротора и, следовательно, магнитная индукция зависит от силы тока в обмотках последнего. Работа пропорциональна также скорости перемещения проводника относительно поля. Кроме того, работа пропорциональна силе индукционного тока, которая зависит от ЭДС индукции и сопротивления замкнутой цепи $\left(I_i = \frac{\mathscr{E}_i}{R}\right)$. Если генератор не подключен под нагрузку, то $I_i = 0$ и работа совершается только против сил трения. Более подробно устройство и действие генератора будет изучаться в X классе.

7. САМОИНДУКЦИЯ. ИНДУКТИВНОСТЬ

Для введения первоначального понятия о самоиндукции можно использовать рассмотренную ранее задачу (см. рис. 11.6). Оба контура при включении и выключении тока находятся в изменяю-

щемся магнитном поле, поэтому в каждом из них должна наводиться ЭДС индукции, которую для внутреннего контура, где изменяется ток, называют ЭДС самоиндукции. Для объяснения влияния ЭДС самоиндукции на ток в контуре *1* лучше всего использовать принцип суперпозиции электрических полей.

Сначала, зная направление тока в цепи, определяют в выбранной точке проводника направление напряженности $\vec{E}_0$ поля, созданного источником тока, а затем по правилу Ленца находят направление напряженности индукционного электрического поля $\vec{E}'$. При замыкании цепи результирующая напряженность $|\vec{E}| = |\vec{E}_0| - |\vec{E}'|$, следовательно, ЭДС самоиндукции препятствует нарастанию тока. При размыкании цепи или уменьшении тока $|\vec{E}| = |\vec{E}_0| + |\vec{E}'|$, т. е. ЭДС самоиндукции препятствует уменьшению тока.

Явление самоиндукции при замыкании цепи демонстрируют на установке, основными частями которой являются дроссельная катушка *L* или катушка на 220 В универсального школьного трансформатора, надетая на замкнутый сердечник, лампы *Л1* и *Л2* на напряжение 3,5 В и силу тока 0,28 А, источник постоянного, желательно регулируемого, напряжения и ключ (схема установки изображена на рисунке 11.12). В дальнейшем в цепь можно включать и другие приборы. Подготавливая опыт, сначала добиваются нормального свечения лампы *Л1*, а затем с помощью реостата — такого же накала лампы *Л2*. При замыкании ключа лампа *Л1* вспыхивает примерно на 1 с позже, чем лампа *Л2*, что объясняется возникновением ЭДС самоиндукции $\mathscr{E}_{is} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ в катушке *L*, т. е. возникновением вихревого электрического поля, напряженность $\vec{E}'$ которого противоположна по направлению напряженности $\vec{E}_0$ поля, создаваемого источником постоянного тока, и потому препятствует его нарастанию.

Следует заметить, что ЭДС самоиндукции возникает и на участке цепи, содержащем лампу *Л2*, но она значительно меньше, так как практически магнитное поле сосредоточено в катушке *L*. Поэтому эта ЭДС заметно на накал лампы *Л2* не влияет.

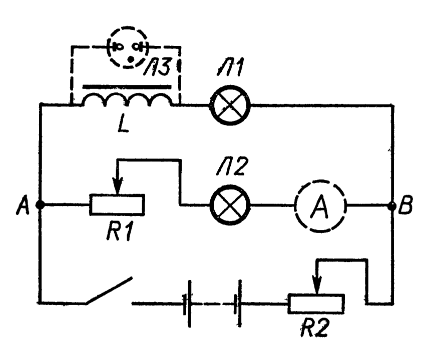


Рис. 11.12

Сделанные выше выводы о направлении напряженности $\vec{E}'$ вихревого электрического поля можно также проверить с помощью такого опыта. В собранную цепь (см. рис. 11.12) дополнительно включают демонстра-

ционный амперметр A, предварительно установив стрелку на нуле посредине шкалы. Предварительно надо определить, в какую сторону отклоняется стрелка амперметра при замыкании ключа. Выяснив это, около стрелки амперметра ставят задержку так, чтобы стрелка при замкнутом ключе оставалась на нуле. Опыт показывает, что при размыкании цепи стрелка отклоняется в противоположную сторону. Это говорит о том, что в замкнутой цепи, содержащей катушку L, лампы *Л1*, *Л2* и амперметр, через катушку L ток (индукционный) течет в том же направлении, что и от источника. Катушка L играет теперь для указанной замкнутой цепи роль источника тока.

Так как магнитный поток пропорционален магнитной индукции, которая, в свою очередь, пропорциональна силе тока, создающего магнитное поле, то можно записать, что $\Phi = LI$, где L — некоторый коэффициент, называемый коэффициентом самоиндукции или индуктивностью контура. С учетом этого выражения и закона электромагнитной индукции получаем:

$$\mathscr{E}_{is} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t},$$

если считать, что форма контура остается неизменной и поток меняется только за счет изменения тока.

ЭДС самоиндукции при быстром изменении тока, например при обрыве цепи, может достигать очень больших значений, во много раз превышающих ЭДС самого источника, и вызвать нежелательные последствия, например пробой изоляции, что следует учитывать в электрических цепях, обладающих значительной индуктивностью. Чтобы показать это, параллельно катушке L подключают неоновую лампу, потенциал зажигания которой значительно выше, чем ЭДС источника тока. После этого вывинчивают лампу *Л2* и размыкают ключ. Неоновая лампа дает яркую вспышку.

Формула для ЭДС самоиндукции позволяет установить единицу индуктивности г е н р и (Гн): 1 Гн = 1 В · с/А.

Индуктивность зависит от размеров проводника, его формы и магнитных свойств среды, в которой находится проводник. Зависимость индуктивности от указанных факторов можно пояснить при помощи той же установки (см. рис. 11.12).

Перед показом опытов на доске вычерчивают схему соединения секций катушки трансформатора. Затем проделывают серию опытов, включая сначала одну — первую или вторую секцию катушки (490 или 422 витка) — и затем обе секции одновременно (клеммы 220 В).

Из запаздывания вспышки лампы *Л1* заключают, что катушка с бо́льшим числом витков обладает большей индуктивностью.

Заменяя сердечники, обнаруживают зависимость индуктивности от магнитной проницаемости среды.

Во всех опытах установившаяся сила тока в разветвлениях цепи должна быть одинаковой.

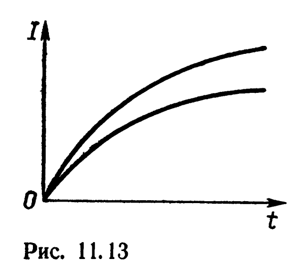


Рис. 11.13

Для закрепления материала полезно решить следующую задачу.

На графиках (рис. 11.13) показано изменение силы тока в катушках при подключении их к источнику постоянного напряжения. Какая катушка обладает большей индуктивностью? В какой момент времени ЭДС самоиндукции была наибольшей? наименьшей?

8. ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТОКА

Весь изученный материал о магнитном поле, и особенно опыты по возникновению ЭДС самоиндукции при размыкании цепи, (см. рис. 11.12) показывает, что магнитное поле обладает энергией. Ставим задачу: получить количественное выражение для энергии магнитного поля тока. Используя установку (см. рис. 11.12), вначале следует качественно пояснить, от каких величин должна зависеть энергия магнитного поля катушки. Для этого, изменяя силу установившегося в катушке тока, наблюдают, что лампа *Л3* светится ярче и дольше, если сила тока больше. Затем, изменяя индуктивность катушки L, например, с помощью сердечника или включения иного числа витков, устанавливают зависимость энергии магнитного поля катушки от ее индуктивности.

Следовательно, энергия магнитного поля тока пропорциональна и силе тока, и индуктивности. Для вывода точной формулы сначала рассматривают процессы в проводнике при замыкании цепи тока. Соответствующие расчеты приведены в учебнике [2, § 102]. Возможен также следующий вариант изложения этой части материала.

Учащимся уже известно, что при замыкании тока ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_{is} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$ противодействует ЭДС источника $\mathcal{E}$. Поэтому среднее за малый промежуток времени Δt значение силы тока определится по закону Ома, записанному в таком виде:

$$I = \frac{\mathcal{E} - L\frac{\Delta I}{\Delta t}}{R}, \text{ откуда } I\mathcal{E}\Delta t = I^2R\Delta t + LI\Delta I.$$

Это означает, что за счет элементарной работы источника тока $I\mathcal{E}\Delta t$ выделяется энергия в виде теплоты $I^2R\Delta t$ и увеличивается энергия магнитного поля тока $\Delta W_м = LI\Delta I$.

По мере нарастания тока энергия $\Delta W_м$ растет и достигает при установившейся силе тока I_0 своего максимального значения. После этого энергия источника тока тратится только на выделение джоулева тепла.

Величину запасенной в магнитном поле энергии $W_м$ находят, зная ее приращение и считая, что сила тока в проводнике возрастала от 0 до некоторого максимального значения I.

$$W_м = \frac{LI^2}{2}.$$

В заключение надо сообщить учащимся, что эту энергию можно выразить и через характеристики поля. Плотность энергии магнитного поля пропорциональна квадрату магнитной индукции, подобно тому как плотность энергии электрического поля пропорциональна квадрату напряженности электрического поля.

Для закрепления материала полезно решить следующие задачи:

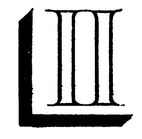
1. Какова энергия магнитного поля катушки с бифилярной намоткой?

2. Какова энергия магнитного поля катушки индуктивностью $L = 10$ Гн, если сила тока в ней $I = 4$ А?

3. Сравнить энергии конденсатора емкостью $C = 10$ мкФ, напряжение на обкладках которого 20 В, и катушки индуктивностью $L = 10$ Гн при силе тока в ней 20 А.

Ответ. Энергия катушки больше в 10^6 раз.

На заключительном уроке полезно провести контрольную или самостоятельную работу, а также повторить наиболее важные или недостаточно усвоенные вопросы применительно к конкретным условиям работы в том или ином классе.



X КЛАСС

КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

ВВЕДЕНИЕ

Колебания и волны различной физической природы изучаются в настоящее время в одном «волновом» концентре. Такое объединение учебного материала вызвано двумя причинами: нет такой области физики и техники, где бы ни проявлялись колебательные и волновые процессы; соответствующие законы обладают универсальностью и всеобщностью. При определении содержания и методов изучения данного раздела необходимо руководствоваться следующими основными факторами:

научной значимостью отобранного для изучения материала;

важностью его практических приложений;

политехнической значимостью материала;

значением учебного материала для формирования диалектико-материалистического мировоззрения и коммунистического воспитания.

Колебательные и волновые движения — один из самых распространенных движений в природе. Изучение колебаний — это мощный инструмент познания, универсальный ключ ко многим тайнам природы. Недаром академик Л. И. Мандельштам говорил, что если посмотреть историю физики, то можно увидеть, что главные открытия, по существу, были колебательными.

Пожалуй, нет такой области техники, где бы не применялись или не учитывались колебательные и волновые процессы. Механические колебания используют в различных технологических процессах и машинах (сортировочные машины, вибрационные конвейеры, вибролитье и т. д.). Электромагнитные колебания — основа действия важнейших электро- и радиотехнических устройств.

В современном производстве многим категориям работников массовых профессий необходимо понимание физических основ технологических процессов или принципа действия машин, механизмов и приборов, в которых используются колебательные и волновые явления (применение переменного тока, демпфирование колебаний в различных приборах и механизмах, борьба с шумами и т. д.).

Содержание волнового концентра позволяет убедительно показать диалектический характер развития взглядов, идей и гипотез, ограниченность тех или иных физических законов и вместе с тем безграничное приближение человеческого знания ко все более сокровенным тайнам природы. Ярким подтверждением этому служит, например, история развития взглядов на природу света.

Специфика раздела приводит к определенной специфике и методов его преподавания. Главное здесь — целеустремленное изучение общих, фундаментальных свойств колебаний и волн, единообразных методов научного исследования.

Во-первых, это проявляется в формировании важнейших обобщенных понятий о колебательных или волновых процессах любой природы: периодичность явлений; единообразие характеризующих их величин (период, амплитуда, фаза и др.); интерференция и дифракция волн и др. Уяснение общих положений облегчает учащимся усвоение материала, поднимает знания на более высокую ступень, делает их более применимыми.

Во-вторых, используется единый математический подход для количественного описания явлений. «Физика колебаний» наглядно иллюстрирует слова В. И. Ленина: «Единство природы обнаруживается в «поразительной аналогичности» дифференциальных уравнений, относящихся к разным областям явлений»[1].

Единообразие и общий подход являются характерной чертой и учебного физического эксперимента. Так, например, аналогичны установки по изучению отражения, преломления, интерференции и дифракции звуковых и электромагнитных волн.

Ввиду специфики материала необходимо в полную меру использовать аналогии. Однако применение аналогий не должно вести к упрощению понятий. Всякие аналогии верны только до определенного предела, о котором должны знать учащиеся.

Расположение учебного материала в целях взаимосвязанного изучения аналогичных явлений для механических и электромагнитных колебаний и волн может быть различным. Сначала можно изучить механические колебания и волны, а затем электромагнитные. Возможно также и такое изучение, при котором важнейшие свойства колебаний и колебательных систем (закон сохранения энергии, резонанс и др.), а также свойства волн (отражение, дифракция, интерференция) рассматриваются одновременно.

В данной книге материал изложен в основном согласно программе и учебнику «Физика-10» [12], т. е. сначала рассматриваются все виды колебаний, а затем волны, однако при этом фундаментальные свойства колебаний и волн обстоятельно изучаются сначала на каком-либо одном, наиболее наглядном примере, а затем уже полученные понятия применяются к другим случаям с широким привлечением аналогий.

---

[1] Ленин В. И. Новейшая революция в естествознании.— Полн. собр. соч., т. 18, с. 306.

Наконец, отметим особое значение при изучении колебаний и волн межпредметных связей физики и математики. Изучаемый материал требует значительной математической подготовки учащихся, без чего сама идея волнового концентра и его преимущества не могут быть реализованы в полной мере.

С точки зрения математической подготовки учащихся изучение раздела в X классе является оптимальным: десятиклассники имеют достаточные знания по всем разделам математики, в том числе уже знакомы с некоторыми вопросами дифференциального исчисления, столь необходимыми для получения и исследования уравнений гармонических колебаний.

ГЛАВА 12

МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

В данной теме дается первоначальное общее понятие о повторяющихся движениях и обстоятельно рассматриваются наиболее простые, но чрезвычайно важные — повторяющиеся движения — гармонические колебания. На примере колебаний пружинного и тяжелого маятников вводятся понятия о смещении, амплитуде, периоде, частоте и фазе, скорости и ускорении, а также превращениях энергии при гармонических колебаниях. Рассматривается также затухание колебаний и резонанс. Поскольку эти понятия «работают» на протяжении всего волнового концентра, они должны быть усвоены прочно и глубоко.

На изучение этих вопросов отводится 10 ч, распределение которых видно из следующего примерного поурочного планирования:

1-й урок. Понятие о повторяющихся движениях, колебательных системах, свободных и вынужденных колебаниях.

2-й урок. Уравнение гармонических колебаний пружинного маятника. Амплитуда, период и частота колебаний.

3-й урок. Уравнение гармонических колебаний математического маятника.

4-й урок. Решение уравнения гармонического колебательного движения. Фаза колебаний.

5-й урок. Скорость и ускорение при гармонических колебаниях. Уравнение периода колебаний.

6-й урок. Лабораторная работа «Определение ускорения свободного падения при помощи маятника».

7-й урок. Превращение энергии при гармонических колебаниях. Затухающие колебания.

8-й урок. Вынужденные колебания. Резонанс.

9-й урок. Автоколебания.

10-й урок. Повторение и обобщение основных понятий темы.

1. ПОВТОРЯЮЩИЕСЯ ДВИЖЕНИЯ. КОЛЕБАНИЯ

Повторяющиеся механические движения относятся к числу самых распространенных в природе и технике движений. Со многими из них учащиеся в той или иной мере уже знакомы из курса

физики или по жизненному опыту: равномерное движение точки по окружности, Земли вокруг Солнца, спутников вокруг Земли, движение поршней двигателя внутреннего сгорания и маятника часов, биение сердца и движение рук и ног при ходьбе.

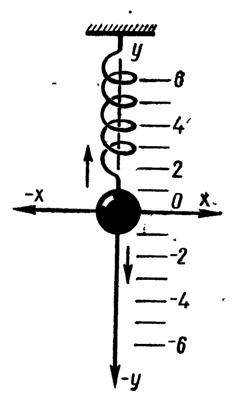


Рис. 12.1

На двух-трех конкретных примерах следует рассмотреть, что общего имеется во всех этих многообразных движениях и что различает их. Для этого можно сопоставить движение точки по окружности и груза на пружине (рис. 12.1). Для обоих движений характерно их повторение. Что же при этом повторяется и какие физические величины характеризуют это повторение? Нетрудно видеть, что с течением времени повторяется местоположение колеблющегося тела или его координаты. При этом следует пояснить важность выбора системы координат. Так, координаты поршня двигателя автомобиля или какой-либо точки колеса повторяются относительно автомобиля и не повторяются относительно Земли. Все повторяющиеся движения являются ускоренными, так как скорость движущихся тел изменяется.

Следовательно, все повторяющиеся движения тел происходят не по инерции, а под действием некоторых сил. Траектории же движения могут быть самыми различными: эллипсами, окружностями, прямыми линиями и т. д.

Частным, но очень важным случаем повторяющихся движений являются *колебания*, т. е. движения, которые повторяются через более или менее определенные промежутки времени. Движения, повторяющиеся через равные промежутки времени, называются *периодическими*. В качестве примера такого движения можно рассмотреть колебание груза на пружине (см. рис. 12.1).

Расположив за шариком экран с нанесенной на нем системой координат, показывают периодическую повторяемость координат шарика при его колебаниях вверх и вниз по оси y. Для данного конкретного случая поясняют также понятие цикла колебаний, понимая под этим, например, совокупность движений шарика: $0 \to 4 \to 0 \to -4 \to 0$. Далее определяют период колебаний T как продолжительность одного цикла колебаний.

Полезно показать колебания маятника метронома, отбивающего через промежутки времени, равные половине периода, звуковые сигналы. Это понятие затем будет углубляться и расширяться.

2. КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ. СВОБОДНЫЕ И ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Колебательные движения происходят под действием некоторых сил, т. е. являются результатом действия на колеблющееся тело других тел. Простейшим примером такой системы служат два одинаковых тела, соединенные пружиной.

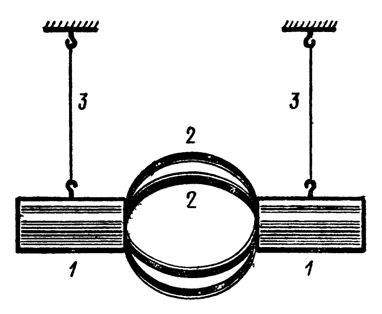


Рис. 12.2

Для демонстрации можно использовать два массивных (1—2 кг) шара или цилиндра *1* (рис. 12.2), соединенных между собой одной или двумя согнутыми кольцом пластинчатыми пружинами *2*. Для компенсации силы тяжести цилиндры подвешивают на нитях *3*. Растянув или сжав пружины, дают возможность телам совершать эффектные слабо затухающие колебания.

Цилиндры в данном опыте движутся в основном под действием внутренних сил — сил упругости пружин *2*[1]. Колебания, происходящие только под действием внутренних сил, называются свободными.

В общем случае колебательную систему составляют несколько тел (в системе, показанной на рисунке 12.2, колеблются два тела). Однако часто рассматривают движение только одного какого-либо тела, так как колебания других тел незначительны или не представляют интереса. Так, например, если увеличить массу одного из цилиндров во много раз или просто прикрепить его к демонстрационному столу, то практически будет колебаться только другой цилиндр, который станет «пружинным маятником», подобным показанному на рисунке 12.1.

В заключение на конкретных примерах следует дать первоначальное понятие о вынужденных колебаниях, которые совершаются телами под действием внешних, периодически изменяющихся сил (движение пилы в руках столяра, качка корабля на волнах, движение щеток стеклоочистителя автомобиля и т. д.).

3. УРАВНЕНИЕ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ПРУЖИННОГО МАЯТНИКА

После качественного рассмотрения собственных колебаний пружинного маятника приступают к выводу уравнения этого движения $x = f(t)$.

Как известно учащимся из курса физики VIII класса, эта основная задача механики решается с помощью второго закона Ньютона $\sum\vec{F} = m\vec{a}$.

Для решения поставленной задачи может быть использована установка (рис. 12.3) с горизонтальным пружинным маятником (сила тяжести груза в среднем положении компенсируется натяжением нити). Достоинство установки — незначительное трение в системе. Недостаток ее в методическом отношении заключается в том, что в ней одновременно представлены и пружинный, и мате-

[1] Действием внешних почти уравновешенных сил упругости нитей *3* и сил тяжести, а также внешних сил трения в первом приближении можно пренебречь.

матический маятники, поскольку на груз действует не только сила упругости, но и равнодействующая сил натяжения нити и силы тяжести. Однако при «сильных» пружинах этой составляющей практически можно пренебречь. Для установки можно использовать пружины от прибора «ведерко Архимеда» и груз массой 0,5—1 кг.

Можно использовать и вертикальные колебания груза на пружине (см. рис. 12.1). Установка в этом случае значительно упрощается, но приходится объяснять роль силы тяжести, что усложняет теорию изучаемого материала.

Приведя груз в колебания, сначала вводят величины, характеризующие данное движение: смещение груза от положения равновесия x, максимальное смещение — амплитуду колебаний x_{max} или A; период колебаний $T = \frac{t}{n}$, где n — число колебаний за время t; частоту колебаний $\nu = \frac{1}{T}$.

По динамометру устанавливают, что упругая сила максимальна при максимальном (равном амплитуде) смещении тела от положения равновесия и равна нулю, когда $x = 0$. Следует также особо обратить внимание на то, что сила всегда направлена к положению равновесия (это справедливо для любых механических колебаний). Положение равновесия тело проходит по инерции. Следовательно, для механических колебаний важна инертность тела или его масса.

Приступая к выводу уравнения движения $x = f(t)$, выбирают инерциальную систему координат, связанную с Землей, приняв за начало координат положение равновесия тела.

Применим к колеблющемуся на пружине телу (материальной точке) второй закон Ньютона $\sum\vec{F} = m\vec{a}$.

Так как движение происходит по горизонтали (вдоль оси x),

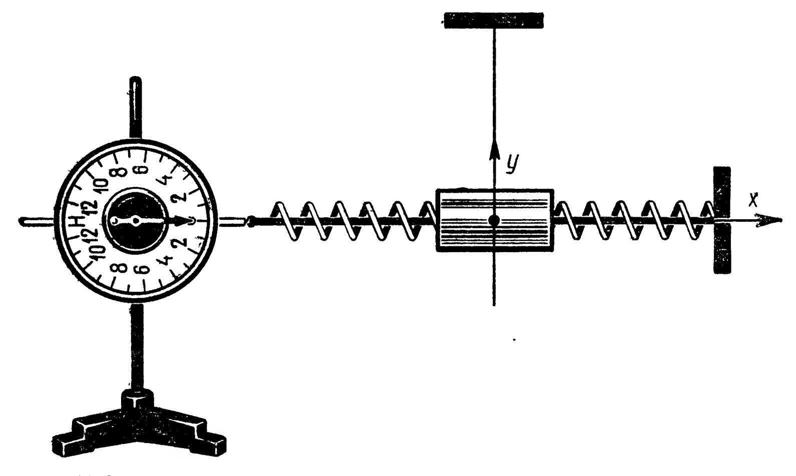


Рис. 12.3

то это уравнение примет вид $F_x = ma_x$. F_x — это проекция на ось x силы упругости пружины, которая определяется законом Гука: $F_x = -kx$. Следовательно, $ma_x = -kx$, откуда $a_x = -\frac{k}{m}x$ или $x'' + \frac{k}{m}x = 0$.

Это и есть искомое уравнение колебаний тела под действием силы упругости. Дальнейшая задача — показать, что аналогичное уравнение справедливо и для ряда других колебаний тел. В качестве примера рассматривают колебания математического маятника.

4. УРАВНЕНИЕ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

Для математического маятника (гиря массой 1—2 кг, подвешенная на нити длиной 1—2 м) на опыте устанавливают следующее.

Движение маятника колебательное, так как гиря многократно смещается вправо и влево от вертикального положения нити; колебательная система состоит из гири, нити и Земли. Инертность тела и в этом случае — обязательное условие колебаний: положение равновесия гиря проходит по инерции.

Дальнейшая задача — определить внутренние силы, вызывающие собственные колебания гири. Это можно сделать двояким образом: а) измерить силу экспериментально и затем найти ее расчетами; б) рассчитать силу теоретически, а затем уже проверить расчеты экспериментом.

Применим первый способ. Прикрепив к гире демонстрационный динамометр, устанавливаем, что так же, как для упругих колебаний, сила пропорциональна смещению. После этого выполняем чертеж (рис. 12.4), изображая прежде всего действующие на колеблющееся тело внутренние для данной системы силы: натяжение нити $\vec{F}_н$ и силу тяжести $\vec{F}_т$. По второму закону Ньютона $\vec{F}_н + \vec{F}_т = m\vec{a}$. $\vec{F}$ — равнодействующая сил $\vec{F}_н$ и $\vec{F}_т$. Она заставляет колеблющееся тело двигаться к положению равновесия. Силу $\vec{F}$ можно разложить на тангенциальную $\vec{F}_\tau = m\vec{a}_\tau$ и нормальную $\vec{F}_n = m\vec{a}_n$ составляющие, которые и сообщают телу соответственно тангенциальное $\vec{a}_\tau$ и нормальное $\vec{a}_n$ ускорения:

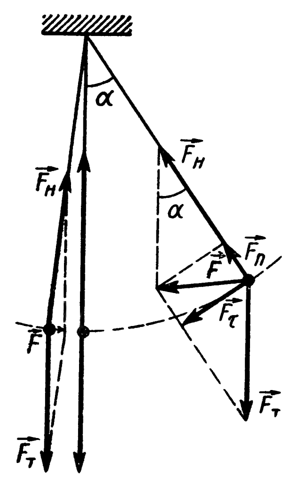


Рис. 12.4

$$F_\tau = F_т \sin\alpha = mg\sin\alpha.$$

Для малых углов $\sin\alpha = \frac{x}{l}$ (при $\alpha =$ $= 4{,}5°$ ошибка $\approx 0{,}1\%$). При этом можно

считать, что векторы $\vec{a}_\tau = \vec{x}''$ и $\vec{x}$ расположены в горизонтальной плоскости на одной прямой, но имеют противоположное направление. Следовательно,

$$F_\tau = -\frac{mg}{l}x,$$

т. е. сила $\vec{F}_\tau$ подобно упругой силе, пропорциональна $\vec{x}$, как это и было показано на опыте. Окончательно получается:

$$x'' + \frac{g}{l}x = 0.$$

Следовательно, колебания пружинного и математического маятников описываются аналогичными уравнениями, которые в общем виде могут быть представлены следующим образом:

$$x'' + k'x = 0.$$

Здесь по усмотрению учителя можно заметить, что, поскольку коэффициент k' — положительная величина, по этой, а также и ряду других причин, которые выяснятся позже, его обычно записывают в виде ω_0^2. Тогда уравнение рассмотренных колебаний примет вид

$$x'' + \omega_0^2 x = 0.$$

Движения, описываемые данным уравнением, называют гармоническими колебаниями.

Согласно данному закону может изменяться не только механическая величина — смещение $\vec{x}$, но и электрические, оптические и другие физические величины.

Для существования механических гармонических колебаний необходимо наличие силы $\vec{F}$, пропорциональной смещению $\vec{x}$ и противоположной ему по направлению.

5. РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ГАРМОНИЧЕСКОГО КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Для определения вида функции $x = f(t)$, показывающей зависимость смещения от времени в гармонических колебаниях, необходимо решить линейное однородное дифференциальное уравнение второго порядка.

Учащиеся X класса не имеют достаточных математических знаний для решения дифференциальных уравнений. Тем не менее в целях устранения догматизма желательно с той или иной степенью строгости обосновать правомерность такого вывода. Для этого можно использовать следующие приемы:

1. **Эмпирическое решение.** Для установления на опыте синусоидальной зависимости координаты тела от времени следует

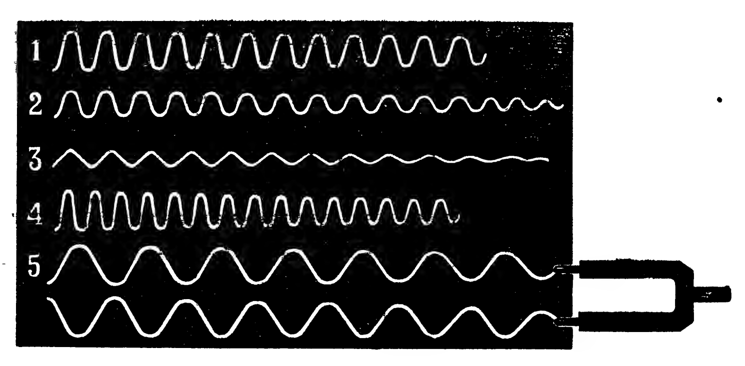


Рис. 12.5

получить на миллиметровой бумаге хорошую запись колебаний пружинного [57, ч. 2, опыт 4] или тяжелого маятника.

Запись колебаний тяжелого маятника на бумаге можно получить с помощью кисточки, смоченной чернилами, или воронки с песком [12, рис. 8]. В последнем случае бумагу смазывают клеем или просто смачивают водой. Главная трудность заключается в том, чтобы обеспечить равномерное перемещение экрана относительно плоскости колебаний маятника. Эту трудность можно обойти следующим образом:

а) перемещать экран с помощью электромоторчика;

б) использовать усредненные данные для нескольких участков синусоиды;

в) записать колебания сравнительно высокой частоты, с тем чтобы можно было считать движение экрана относительно плоскости колебаний в течение одного периода с достаточной степенью точности равномерным. Такую запись проще всего получить на закопченном стекле с помощью камертонов (рис. 12.5). Запись колебаний камертона следует увеличить с помощью теневого проецирования, кодоскопа или оптической скамьи.

При этом на основе аналогичности графиков маятников и камертонов следует заключить, что колебания последних являются гармоническими.

Приняв значение амплитуды колебания за единицу, по графику находят относительные значения смещений колеблющегося тела для моментов времени, $t_1 = 0$, $t_2 = \frac{T}{16}$, $t_3 = \frac{T}{8}$, $t_4 = \frac{T}{4}$ и т. д.

С точностью до второго десятичного знака нетрудно получить, что $y_1 = 0$; $y_2 \approx 0{,}88$, $y_3 \approx 0{,}71$, $y_4 \approx 0{,}93$ и т. д.

По таблице тригонометрических функций устанавливают, что такая зависимость соответствует функции $y = \sin x$.

В данном случае $x = vt$, где v — скорость перемещения экрана. Поэтому $y = \sin vt$. С тем же основанием можно записать, что

$$y = \cos vt.$$

2. Сопоставление вращательного и колебательного движения. Проекция точки, движущейся равномерно по окружности, на плоскость, перпендикулярную той, в которой происходит вращение, совершает гармонические колебания. Это позволяет по вращению точки определить для любого ее положения время t, а по проекции — смещение x и таким образом установить зависимость $x = f(t)$. Предварительно, однако, необходимо доказать учащимся, что проекция точки совершает колебания по тому же закону, что и пружинный или математический маятники.

Для этого с помощью теневого проецирования [12, рис. 11; 57, ч. 2, опыт 3] сравнивают колебания тени вращающегося, например на центробежной машине, шарика и пружинного маятника. Однако при выполнении опыта следует иметь в виду, что практически добиться совпадения колебаний тени и груза на пружине нелегко. Мало помогает и применение электродвигателя. Поэтому целесообразнее поставить опыт с проекцией колебания конического маятника (рис. 12.6). Для этого берут два маятника *1* и *2* длиной 1—1,5 м и укрепляют один у классной доски, а другой на штативе, установленном на демонстрационном столе. Установку освещают со стороны класса таким образом, чтобы движение тени от шарика конического маятника *1* совпадало с движением шарика плоского маятника *2* у доски. Вместо нитяного маятника *2* можно использовать пружинный маятник. Равенство периодов и амплитуд конического и пружинного маятников подбирают на опыте.

Взяв за начальное положение наибольшее смещение x_{max} шарика вправо от вертикали (если смотреть со стороны класса), получим для любого другого положения значение смещения $x = x_{max} \cos \varphi = x_{max} \cos \omega t$. По этому закону и совершаются гармонические колебания маятника.

Для учителя заметим, что аналогичная зависимость получается и при проецировании маятника на ось z. Таким образом, равномерное движение точки по окружности можно представить как совокупность двух гармонических колебаний во взаимно перпендикулярных направлениях, происходящих по закону: $x = x_{max} \cos \omega t$; $z = z_{max} \sin \omega t$, где $x_{max} = z_{max} = R$. $x^2 = R^2 \cos^2 \omega t$; $z^2 = R^2 \sin^2 \omega t$; $x^2 + z^2 = R^2$ — уравнение окружности радиусом R.

И наоборот, каждому гармоническому колебанию, точнее, двум взаимно перпендикулярным гармоническим колебаниям $x = R \cos \omega t$ и $z = R \sin \omega t$ можно сопоставить равномерное

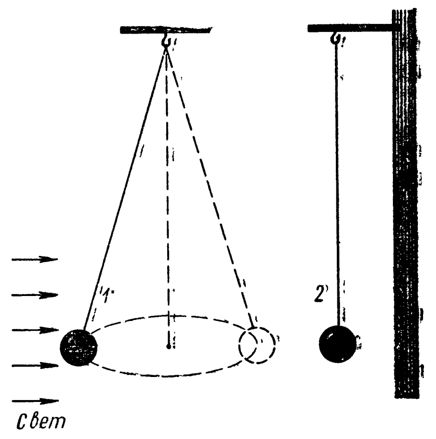


Рис. 12.6

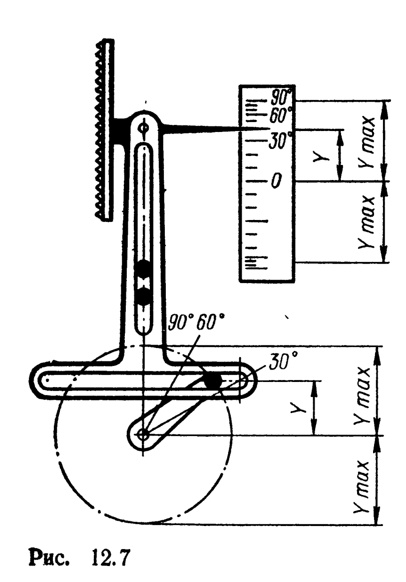


Рис. 12.7

движение точки по окружности.

В общем виде эту мысль полезно довести до учащихся.

Интересный методический прием, позволяющий вывести уравнение гармонических колебаний с помощью технического примера, использован в учебнике физики для X класса школ ГДР. Связь вращательного и колебательного движения в учебнике показана на примере действия кривошипа опиловочного станка (рис. 12.7), что позволяет вывести уравнение гармонических колебаний в виде $y = y_{max} \sin \varphi = y_{max} \sin \omega t$.

3. Сопоставление правой и левой частей уравнения $x'' = -\frac{k}{m}x$ **с функцией синуса и ее второй производной.** Этот прием использован в учебнике «Физика-10» [12, § 6].

4. Приближенный численный метод решения. Этот метод полезно рассмотреть на факультативных занятиях или с учащимися, проявляющими повышенный интерес к физике и математике[1].

Каждый из способов позволяет получить в итоге зависимость вида

$$x = A \cos nt.$$

Физический смысл величины A очевиден: это наибольшее смещение колеблющейся точки от положения равновесия. Дальнейшая задача заключается в уяснении смысла величины n.

Наиболее просто и наглядно смысл n обнаруживается для случая гармонического колебания, являющегося проекцией вращательного движения

$$x = A \cos \omega t,$$

где ω — угловая скорость равномерного вращения точки по окружности.

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu.$$

Следовательно, ω — это число колебаний за 2π с. Поэтому ω называют циклической или круговой частотой.

Поскольку же любому механическому гармоническому колебанию можно сопоставить соответствующее вращательное движение

[1] См.: Яворский Б. М., Пинский А. А. Основы физики. М., 1969, т. I, с. 86—87.

с угловой частотой ω и амплитудой $x_{max} = R$, то этот вывод является общим.

Далее, следуя учебнику [12, § 6], поясняют смысл k или ω, используя свойства циклической функции синуса или косинуса.

6. ФАЗА КОЛЕБАНИЙ. РАЗНОСТЬ ФАЗ

Фазу колебаний определяют как величину, стоящую под знаком косинуса или синуса в решении уравнения гармонических колебаний.

Это определение в дальнейшем будет расширяться и углубляться, приобретая соответствующий физический смысл.

Фазу можно записать так:

$$\varphi = \omega t = 2\pi \frac{t}{T}.$$

Следовательно, фаза колебаний φ пропорциональна величине $\frac{t}{T}$, т. е. времени колебаний, выраженному в долях периода T.

Если же фазу записать в виде $\varphi = t : \frac{T}{2\pi}$, то можно сказать, что фаза — это мера времени, прошедшего от начала колебаний и выраженного в единицах, в 2π раз меньших, чем период T.

Следующий шаг — введение понятия начальной фазы. Нетрудно с помощью подстановки проверить, что решением дифференциального уравнения $x'' = -\omega^2 x$ является не только выражение $x = x_{max} \cos \omega t$, но и выражение $x = x_{max} \cos (\omega t + \varphi_0)$, где φ_0 — начальная фаза колебаний.

При формировании этого понятия полезно использовать аналогию формул: $\varphi = \omega t + \varphi_0$ (фаза гармонического колебания движения) и $s = vt + s_0$ (перемещение равномерного прямолинейного движения). Сравнение формул $x = x_{max} \cos (\omega t + \varphi_0)$ и $x = x_{max} \cos \omega t$ позволяет также ввести понятие разности фаз. В данных случаях эта разность равна φ_0.

Понятие разности фаз следует также пояснить с помощью демонстраций и анализа графиков движений, решения задач. Так, например, полезно показать колебания пружинных маятников с разными фазами, проанализировав соответствующие графики; колебания в противоположных фазах ножек камертона (см. рис. 12.5) и т. п. Результаты наблюдений полезно также закрепить путем решения следующей экспериментальной задачи:

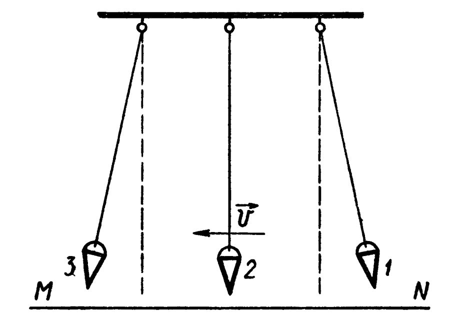


Рис. 12.8

На трех длинных нитях подвешены воронки с песком (рис. 12.8), которые

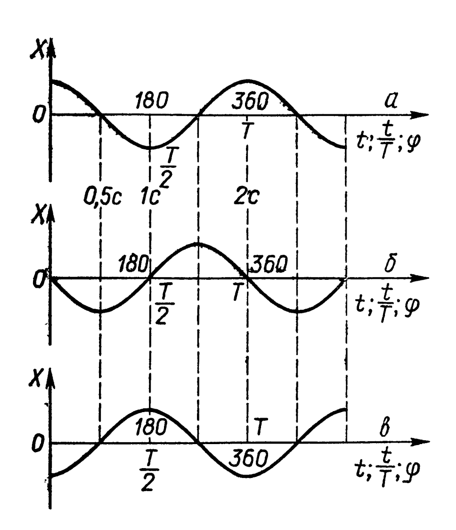


Рис. 12.9

колеблются как математические маятники. Определить минимальное значение разности фаз колебаний маятников *2* и *3* относительно маятника *1* и изобразить графики колебаний каждого маятника. Отклонение маятников от положения равновесия считать равным амплитуде. Экран *MN* движется от наблюдателя за плоскость чертежа.

Решение. При решении этой и последующих задач, если нет в том специальной необходимости, за значения фазы (угла) будем принимать ее наименьшее значение.

Условимся также за начало координат принимать положение равновесия, если это не будет специально оговорено, а отсчет времени вести с момента начала движения тела из крайнего правого положения, когда смещение x положительно.

Для этого момента $x = x_{max}$; $\varphi_0 = 0$. Разностью же фаз назовем $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$, где φ_2 — фаза второго, а φ_1 — фаза первого маятника.

Для второго маятника $x = 0$ (с переходом от положительных значений к отрицательным). Следовательно, $\varphi_2 = \frac{\pi}{2}$ и $\Delta\varphi = \frac{\pi}{2}$. Аналогично находим, что для маятников *1* и *3* разность фаз равна π — маятники колеблются в противоположных фазах. Графики трех колебаний показаны на рисунке 12.9. Они должны быть хорошо поняты учащимися, так как в дальнейшем будут использоваться много раз, в том числе при изучении формул и графиков гармонических колебаний, а также фазовых соотношений величин, характеризующих электромагнитные колебания.

В связи с понятием разности фаз следует пояснить целесообразность записи уравнения гармонических колебаний в виде

$$x = x_{max} \cos \omega t \text{ или } x = x_{max} \sin \omega t.$$

Обычно начало отсчета времени удобно выбирать так, чтобы смещение в этот момент времени было максимальным или минимальным. При записи уравнения движения в виде $x = x_{max} \sin \omega t$ отсчет времени ведется с момента прохождения тела через положение равновесия (при $t = 0$ $x = 0$), а при записи уравнения в виде $x = x_{max} \cos \omega t$ отсчет времени ведется с момента наибольшего отклонения от положения равновесия (при $t = 0$ $x = x_{max}$). Так практически и поступают, когда подсчитывают время или число

колебаний маятника, поскольку трудно зафиксировать положение шарика в средней точке, где он имеет максимальную скорость.

С математической точки зрения обе эти функции эквивалентны, но их аргументы отличаются сдвигом фаз на $\frac{\pi}{2}$, так как $\cos \omega t = \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$. В этом смысле можно сказать, что график на рисунке 12.9, *а* — косинусоида, а на рисунке 12,9, *б* — синусоида.

7. СКОРОСТЬ И УСКОРЕНИЕ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЯХ

Проекция скорости колебательного движения на ось Ox — это первая производная координаты $x = x_{max}\cos(\omega t + \varphi_0)$ по времени. При $\varphi_0 = 0$ $v = x' = -x_{max}\sin \omega t = x_{max}\,\omega \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$.

Полученную формулу сопоставляют с формулой проекции перемещения $x = x_{max}\cos \omega t$ и устанавливают, что $\varphi'' = \varphi + \frac{\pi}{2}$, т. е. вектор скорости опережает по фазе вектор перемещения на 90°. Этот факт должен быть рассмотрен и как следует осмыслен с помощью графиков (см. рис. 12.9) и демонстраций.

Наблюдая достаточно медленные ($T \approx 2$ с) колебания маятника, нетрудно установить, что в соответствии с формулами и графиками скорость колеблющейся частицы максимальна в момент прохождения положения равновесия и равна нулю в крайнем положении.

Ускорение колеблющегося тела согласно формуле $a_x = \frac{F_x}{m} = -\frac{k}{m}x$ изменяется, так как изменяется сила $\vec{F}$. Наибольшее по модулю ускорение тело имеет в крайних положениях при максимальном смещении, а наименьшее, равное нулю,— в положении равновесия. Из курса математики известно, что $a_x = v'_x$. Так как $v_x = x_{max}\,\omega\cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$, то $a_x = -x_{max}\,\omega^2 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = x_{max}\,\omega^2\cos(\omega t + \pi)$. Следовательно, ускорение по фазе опережает скорость на $\frac{\pi}{2}$, что подтверждает сделанный ранее вывод.

Наглядное соотношение фаз смещения точки, ее скорости и ускорения при гармонических колебаниях следует пояснить с помощью графиков, подобных показанным на рисунке 12.9.

8. ПЕРИОДЫ КОЛЕБАНИЙ ПРУЖИННОГО И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКОВ

Решением уравнения гармонических колебаний $x'' + \frac{k}{m}x = 0$ является функция $x = x_{max}\cos \omega t$, в результате подстановки которой находим, что $\omega^2 = \frac{k}{m}$.

Так как $\omega = \frac{2\pi}{T}$, то период колебаний пружинного маятника $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$.

Используя одну и ту же пружину (см. рис. 12.1), но значительно отличающиеся по массе гири, наглядно обнаруживают увеличение периода T с увеличением массы m. Подвешивая одну и ту же гирю к пружинам, значительно отличающимся по жесткости, показывают уменьшение периода с увеличением жесткости.

Аналогично, используя уравнение $x'' + \frac{g}{l}x = 0$, находят, что период колебания математического маятника равен $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$. Впервые эта формула получена Гюйгенсом. Вывод формулы по Гюйгенсу может быть сделан при решении соответствующей задачи [68, с. 28].

Период колебаний пружинного и математического маятников не зависит от амплитуды. Для математического маятника этот факт установил Галилей (1583).

Зависимость периода колебаний маятника T от длины l нетрудно показать на опыте, взяв, например, маятники, отличающиеся по длине в 4 раза. Зависимость же периода T от ускорения свободного падения можно пояснить только косвенным образом, собрав установку, в которой железный шарик, подвешенный на нити, заставляют совершать колебания над полюсом магнита или электромагнита.

В этой связи желательно рассказать учащимся о гравиметрическом методе разведки полезных ископаемых, об истории открытия и изучения Курской магнитной аномалии [44, с. 103].

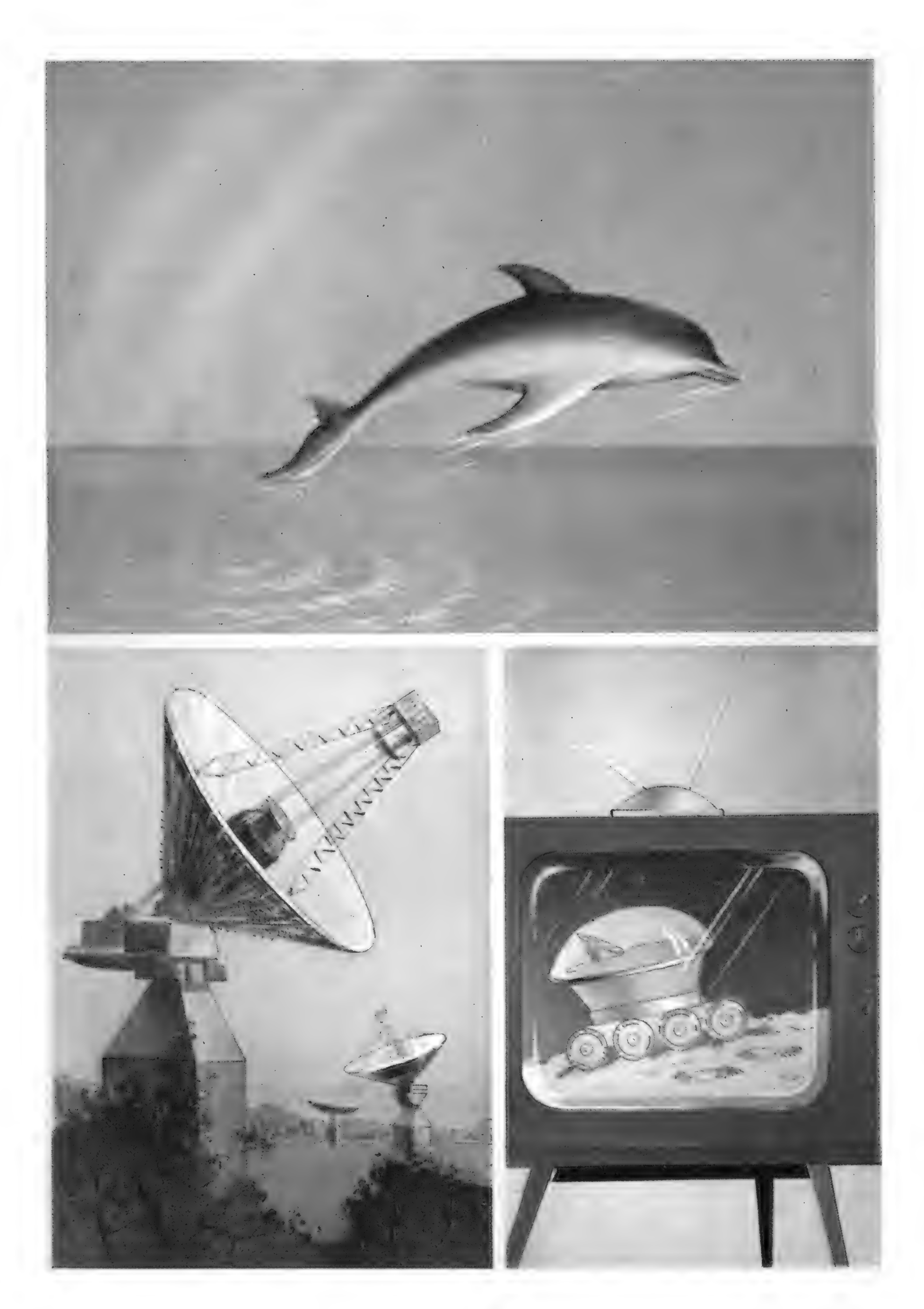
Сравнивая формулы $T_п = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ и $T_м = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$, обращают внимание на тот факт, что период колебаний математического маятника, в отличие от пружинного, не зависит от его массы. Объясняется это тем, что для квазиупругих колебаний математического маятника коэффициент $k = \frac{mg}{l}$, т. е. пропорционален массе.

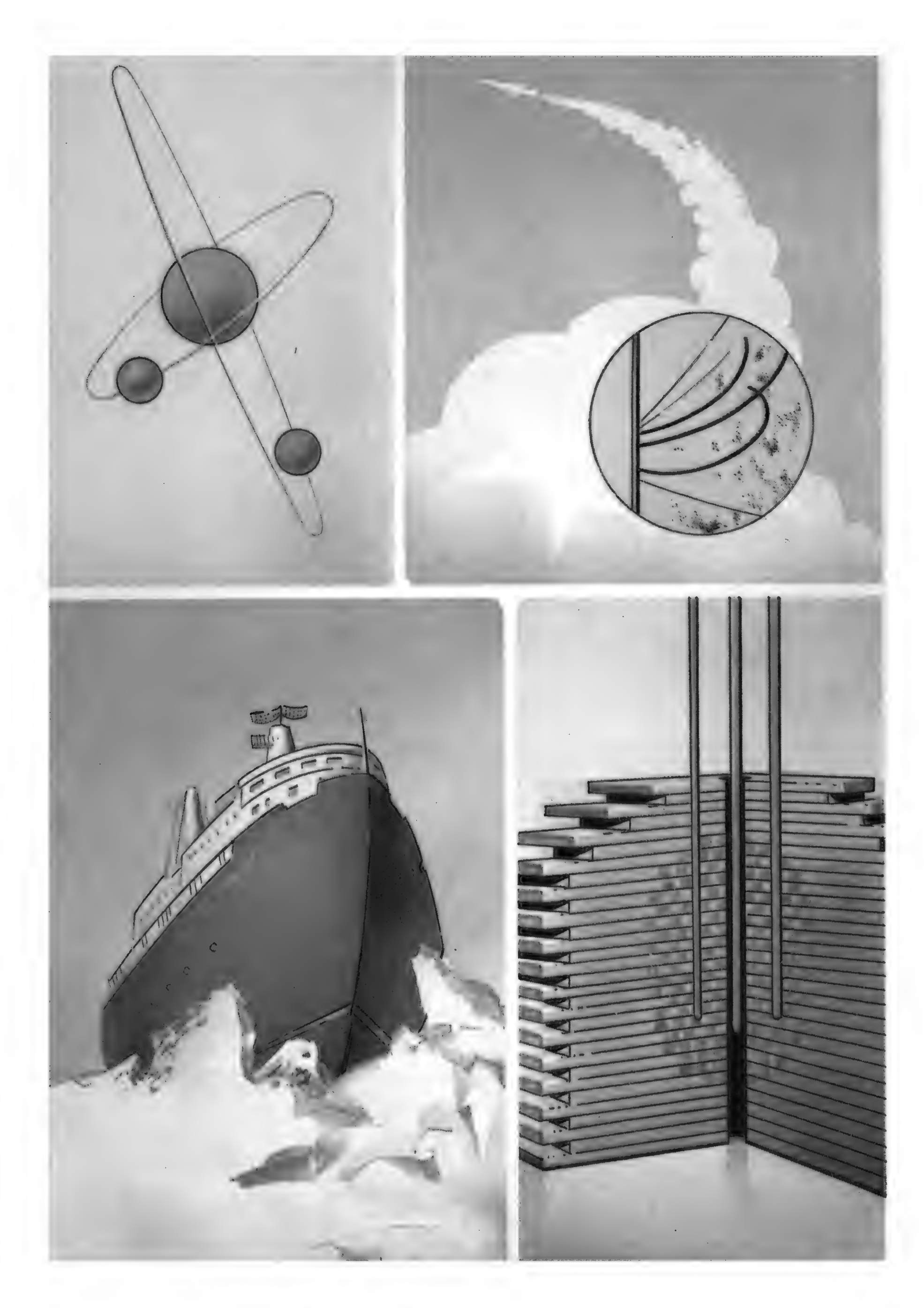
Для закрепления материала программой предусмотрено проведение лабораторной работы «Определение ускорения свободного падения при помощи маятника» [81]. В качестве дополнительных заданий в данную работу желательно включить проверку независимости периода колебаний маятника от амплитуды и массы.

Для закрепления материала полезно решить задачи, поясняющие устройство и действие маятниковых часов [27, № 713—714].

9. ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЯХ

В X классе обязательным является изучение только вопроса о законе сохранения энергии при колебательном движении. При





этом надо иметь в виду замкнутые системы, в которых рассматриваются колебания (математический маятник и Земля; пружинный горизонтальный маятник и крепящая его скоба и т. п.).

Применительно к пружинному маятнику для крайнего положения тела можно записать, что потенциальная энергия $W_p = \frac{kx^2_{max}}{2}$, а кинетическая энергия $W_k = 0$.

Для среднего положения $W_k = \frac{mv^2_{max}}{2}$; $W_p = 0$.

Согласно закону сохранения энергии $\frac{kx^2_{max}}{2} = \frac{mv^2_{max}}{2}$.

Для закрепления материала полезно решить следующие задачи:

1. Покажите, что для любого положения пружинного маятника его полная энергия $W = \frac{kx^2_{max}}{2} = \frac{mv^2_{max}}{2}$.

2. Математический маятник, имеющий массу $m = 0{,}1$ кг и длину $l = 1$ м, отклонили на 5 см. Какую скорость v, ускорение a и потенциальную энергию W_p он будет иметь на расстоянии $x = 2$ см от положения равновесия?

В ознакомительном плане действие закона сохранения импульса применительно к колебательным системам можно пояснить на следующих примерах:

1. В приборе (см. рис. 12.2) соединенные пружиной цилиндры колеблются всегда в противофазах, перемещаясь в противоположных направлениях так, что центр масс системы остается на одном месте.

2. Остается неизменной сумма импульсов ножек камертона (рис. 12.5), которые тоже колеблются в противофазах. Благодаря этому, несмотря на то что на каждую ножку действует весьма значительная сила упругости, камертон можно держать в руке. (Камертон с одной ножкой пришлось бы прочно закрепить, например, в тисках.)

По теме возможно также решение качественных задач [68, с. 13], расширяющих сведения о колебательных движениях. Эти задачи служат хорошим повторением законов сохранения в механике.

10. ЗАТУХАЮЩИЕ КОЛЕБАНИЯ

Во всех ранее рассмотренных примерах колебания с течением времени обязательно затухали, становились менее интенсивными и, наконец, прекращались совсем. Причиной затухания является отрицательная работа сил трения. Явление можно пояснить эффектным опытом затухания колебаний столбов воды в сообщающихся сосудах (см. рис. 13.2), если на поверхность воды добавить дыма. При каждом колебании столб воды выталкивает порцию дыма, затрачивая на это некоторую энергию. (В дальнейшем этот опыт можно использовать при изучении волн.)

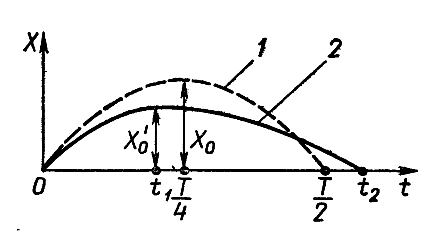


Рис. 12.10

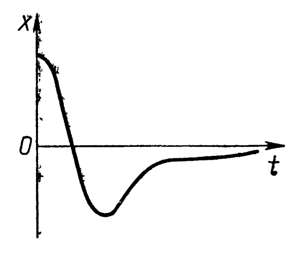


Рис. 12.11

Для замкнутой колебательной системы справедливо уравнение $W + U = \text{const}$, где W — механическая энергия свободных колебаний, а U — внутренняя энергия.

Из-за несовершенства упругих свойств материала происходит постоянное превращение части механической энергии W во внутреннюю энергию тел U, о чем можно, в частности, судить по их нагреванию.

Внутреннее трение[1] и, следовательно, затухание колебаний для разных материалов различно. Для пояснения этого можно, например, сравнить затухание колебаний двух шариков, подвешенных на стальной и медной пружинах.

Помимо внутреннего трения, практически всегда существует и внешнее. Полезно подчеркнуть, что силы внешнего трения могут быть обусловлены не только сопротивлением воздуха, воды и других тел, но и действием электромагнитных полей. В связи с этим можно повторить или сослаться на известный учащимся из курса физики IX класса опыт по торможению металлического маятника токами Фуко [57, ч. 1, опыт 174].

График затухающих колебаний нетрудно получить, используя маятник с воронкой, наполненной песком, демпфировав его листом бумаги. Наглядные графики получаются также на закопченной стеклянной пластинке с помощью камертона с острием (см. рис. 12.5). Наконец, можно использовать самодельный «камертон» больших размеров, позволяющий записывать характерные графики затухающих колебаний на классной доске мелом [68, рис. 23].

Для слабо затухающих гармонических колебаний условно «периодом» T называют время между двумя прохождениями телом положения равновесия в одном направлении. Для одной и той же среды, тормозящей колебания, «период» T — величина постоянная.

График сильно затухающих колебаний значительно отличается от графика синусоидных колебаний. Для этих колебаний период $T_з$ уже заметно больше периода T собственных колебаний и график *2* затухающих колебаний (рис. 12.10) в отличие от синусоиды *1* является несимметричной кривой с крутым «подъемом» и более

[1] Внутренним трением называется трение между частицами одного и того же сплошного тела. В твердом теле с ним связано наличие остаточных деформаций [см.: 16, т. I].

пологим «спуском». Такую особенность графика можно объяснить следующим образом.

От положения равновесия до максимального отклонения (остановки) маятник движется некоторое время $t_1 < \frac{T}{4}$, так как его движение тормозит сила трения. По той же причине к положению равновесия маятник будет двигаться в течение времени $t_2 > \frac{T}{4}$. При этом $t_1 + t_2 > \frac{T}{2}$.

Трение может быть столь значительным, что колебание станет апериодическим (рис. 12.11) или даже не возникнет совсем. Это не трудно показать на опыте с маятником, шарик которого погружен в вязкую среду.

Из практических применений затухающих колебаний можно рассказать о демпфировании подвижных частей электроизмерительных приборов, аналитических весов, применении масляных амортизаторов в мотоциклах и автомашинах и др.

11. ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ

В X классе вынужденные колебания изучаются в основном качественно на основе демонстрационного эксперимента. В методической литературе описан ряд установок, служащих этой цели [57, ч. 2, опыт *8*].

Для изучения вынужденных колебаний можно использовать установку, показанную на рисунке 12.12. Вынуждающая сила, действующая на пружину, создается с помощью кривошипа или эксцентрика *1*, насаженного на вал центробежной машины, которая приводится в движение электродвигателем *2*. Более простая установка описана в пособии [68, рис. 24].

Первоначально движение бывает сложное. Установление вынужденных колебаний требует некоторого времени, которое можно уменьшить, если к гире *3* прикрепить воздушный демпфер.

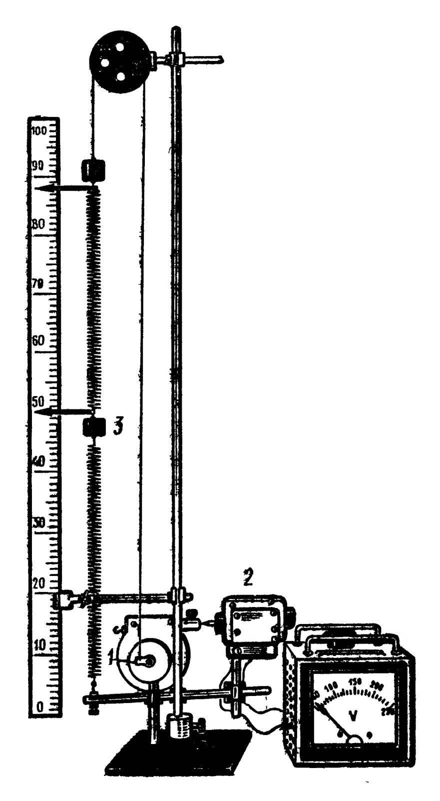


Рис. 12.12

Вначале работа внешней силы, пропорциональная амплитуде колебаний груза, будет превышать потери энергии на трение в системе и груз будет раскачиваться все интенсивнее, приобретая кинетическую энергию.

Однако с течением времени работа внешней силы станет равной потерям энергии на трение[1]. При установившемся режиме и синусоидальной внешней силе тело начнет совершать гармонические колебания с частотой вынуждающей силы.

На примере этого опыта также видно важнейшее отличие свободных колебаний от вынужденных: при свободных колебаниях система получает энергию только один раз, когда она выводится из положения равновесия, а при вынужденных колебаниях энергия пополняется все время за счет работы вынуждающей силы.

Амплитуда вынужденных колебаний пропорциональна амплитуде вынуждающей силы.

12. РЕЗОНАНС

На конкретных примерах учащимся показывают, что амплитуда вынужденных колебаний зависит от частоты внешней силы. Используя установку (см. рис. 12.12), сначала определяют собственную частоту колебаний груза *3*, а затем исследуют зависимость амплитуды вынужденных колебаний от частоты вынуждающей силы ω. Первоначально опыт выполняют при слабо затухающих колебаниях и получают следующие выводы:

1. Если $\omega \ll \omega_0$, амплитуда приближенно равна статическому смещению. Это не трудно показать на опыте, медленно вращая ручку центробежной машины. Груз будет подниматься и опускаться при неизменном статическом растяжении пружины.

2. Если $\omega \gg \omega_0$, то амплитуда колебаний при очень больших частотах стремится к нулю. Такой результат можно объяснить инертностью колеблющегося тела, «не успевающего следовать за изменениями силы».

Во всех случаях, когда частота ω внешней силы отличается от собственной частоты ω_0 колебаний системы, внешняя сила бывает направлена то по направлению движения тела (работа силы положительна), то против него (работа отрицательна). Поэтому в целом за счет работы силы механическая энергия системы пополняется незначительно.

При некоторой (резонансной) частоте амплитуда колебаний резко возрастает. Измерив тахометром число оборотов центробежной машины, устанавливают, что $\omega_{рез} \approx \omega_0$.

---

[1] С увеличением амплитуды и скорости колебаний потери энергии будут все время расти пропорционально и амплитуде, и силе трения. Сила же трения в том случае, когда она пропорциональна скорости, также растет пропорционально амплитуде, т. е. потери энергии пропорциональны квадрату амплитуды.

Явление объясняют следующим образом. При $\omega = \omega_0$ вынуждающая сила направлена по направлению скорости. Но скорость опережает по фазе на $\frac{\pi}{2}$ смещение колеблющейся точки. Следовательно, и сила опережает смещение на $\frac{\pi}{2}$ (четверть периода) и всегда совершает положительную работу.

Таким образом в системе создаются наиболее благоприятные условия для пополнения энергии. При постоянной амплитуде внешней силы получается максимальная амплитуда колебаний. Сила трения в этом случае компенсируется внешней силой, и тело движется только под действием внутренних сил. Колебания поддерживаются с максимальной амплитудой при минимальных затратах энергии. Поэтому явлением резонанса и называют возрастание амплитуды вынужденных колебаний при условии, что частота вынуждающей силы близка к частоте собственных колебаний системы.

Явление резонанса демонстрируют с помощью опыта с набором маятников различной длины [21, т. III, рис. 26; 57, ч. 2, опыт 9]. Выразительна также демонстрация при помощи установки, показанной на рисунке 12.13 . Основание маятника метронома *1* соединяют нитью *3* с нитью маятника *2*. Маятник качается с наибольшей амплитудой, когда его период совпадает с периодом колебаний метронома.

Следует обратить внимание на то, что резонанс может вызываться и негармоническими периодическими силами. Примером этого может служить раскачивание качелей, которые подталкиваются отдельными толчками в такт колебаниям. Толчки при этом могут действовать на качели и не при каждом их размахе, а, например, через один или через несколько качаний. В этом случае период негармонической периодической силы может быть равен или превышать в целое число раз период собственных колебаний системы.

Характер вынужденных колебаний в большой мере зависит и от сил трения. С увеличением силы трения амплитуда вынужденных колебаний при резонансе

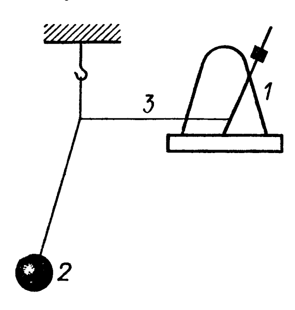


Рис. 12.13

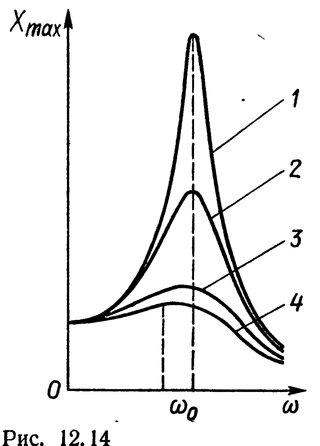


Рис. 12.14

уменьшается, так как работа внешней силы в значительной мере идет на пополнение внутренней энергии тел. Графики резонансных кривых показаны на рисунке 12.14. Кривые *1*, *2* и *3* [12, рис. 19] соответствуют условию $\omega_{рез} \approx \omega_0$. При значительном увеличении трения (кривая *4*) $\omega_{рез} < \omega_0$.

Необходимо также рассмотреть примеры вредных и полезных проявлений резонанса.

13. АВТОКОЛЕБАНИЯ

Рассмотренные ранее вынужденные колебания происходят под действием внешней периодической силы. Но оказывается, что незатухающие колебания могут возникать и без действия внешних сил, т. е. в замкнутых системах, которые обычно можно разделить на три основных элемента: собственно колебательную систему в узком смысле этого слова, источник энергии и регулирующее устройство, обеспечивающее соответствующее поступление энергии для компенсации ее неизбежных потерь при колебаниях (рис. 12. 15).

Вынужденные колебания происходят под действием периодической силы, характер которой и определяет вид колебаний. Автоколебания же могут происходить при действии постоянной силы (силы тяжести, силы давления пара, воздуха и т. д.), и потому их характер определяется главным образом свойствами самой колебательной системы. При этом существенную роль играют потери энергии.

При малых потерях энергии и, следовательно, незначительном воздействии на собственно колебательную систему ее колебания близки к собственным, например гармоническим (колебания маятника часов). При значительных потерях энергии автоколебания уже сильно отличаются от собственных.

Изучение автоколебаний следует начать с рассмотрения схемы (рис. 12.15), в соответствии с которой дают принципиальное понятие об автоколебательных системах, опираясь на пример колебания маятника в часах без детального разбора действия анкерного механизма. Затем можно показать какую-либо несложную автоколебательную систему, понятную учащимся «с первого взгляда», например автоколебания пружинного маятника [57, ч. 2, опыт 12] или модель маятника в первичных электрических часах (рис. 12.16).

При движении маятника *1* вправо от положения равновесия

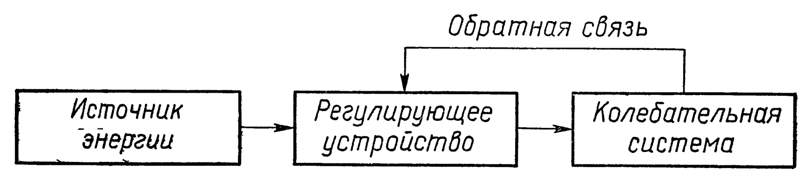


Рис. 12.15

свободно висящая серьга 2, изготовленная из непроводящего материала, отклоняется влево, не замыкая контактов 3 и 4. При обратном же движении маятника серьга задерживается упором 5, отжимает контактную пластинку 3 вниз, замыкает контакт и тем самым включает электромагнит *М*. Маятник получает очередной импульс (пополняет запас энергии).

После этого, используя рисунок в учебнике [12, рис. 22] или теневую проекцию анкерного механизма, можно воспроизвести действие анкерного механизма в замедленном темпе, пояснив, как и почему на маятник действуют периодические толчки [12, § 16].

В зависимости от бюджета времени желательно продемонстрировать и другие автоколебательные системы, например электрический звонок.

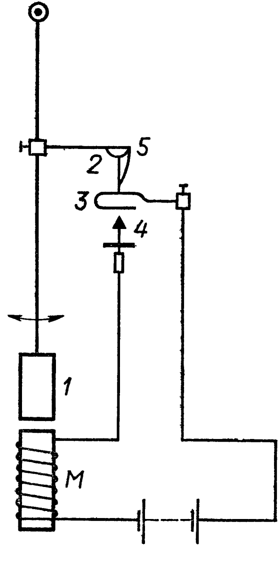


Рис. 12.16

ГЛАВА 13

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

В данной теме рассматриваются свободные электромагнитные колебания и автоколебания в колебательных контурах, а также вынужденные колебания в электрических цепях под действием синусоидальной ЭДС. Все эти вопросы имеют большое значение для физического и политехнического образования учащихся. На их основе затем изучаются электромагнитные волны с их научными и практическими приложениями — передача и использование электрической энергии, успехи и перспективы электрификации, радиофикации, автоматизации производственных процессов и т. д.

Для методики изучения электромагнитных колебаний особенно важны следующие положения:

использование аналогий механических и электромагнитных колебаний;

широкое применение физического эксперимента;

изучение и объяснение существа явлений на основе полученных в IX классе знаний об электрическом и магнитном полях и электромагнитной индукции.

Содержание материала и последовательность его изучения видны из следующего примерного поурочного планирования:

1-й и 2-й уроки. Повторение материала об электромагнитной индукции. Свободные и вынужденные электрические колебания.

3-й урок. Колебательный контур.
4-й и 5-й уроки. Повторение основных сведений о механических колебаниях. Уравнения гармонических колебаний в контуре. Упражнения.
6-й урок. Переменный электрический ток.
7-й урок. Действия переменного тока. Действующее значение силы тока и напряжения.
8-й урок. Активное сопротивление в цепи переменного тока.
9-й урок. Цепь переменного тока с емкостью.
10-й урок. Цепь переменного тока с индуктивностью.
11-й и 12-й уроки. Общий случай цепи переменного тока. Решение задач.
13-й урок. Мощность в цепи переменного тока.
14-й урок. Трехэлектродная электронная лампа.
15-й урок. Ламповый генератор незатухающих колебаний.
16-й урок. Обобщающее повторение или контрольная работа.

Первый урок является вводным. На этом уроке полезно дать учащимся краткие сведения об истории открытия электромагнитных колебаний [68, с. 38] и восстановить в памяти основные сведения о законе электромагнитной индукции $\mathscr{E}_i = -\Phi'$ и самоиндукции $\mathscr{E}_{is} = -LI'$. После этого учащимся дают первоначальные общие понятия о свободных и вынужденных электрических колебаниях. В качестве индикатора здесь впервые в полной мере используется электронный осциллограф, принцип действия которого следует кратко пояснить [12, § 17].

Наиболее важный и сложный материал содержат 3-й — 5-й уроки. Для успешного его усвоения необходимо предварительно повторить основные сведения об уравнениях гармонических колебаний и широко использовать метод аналогий.

1. КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ КОНТУР

Вначале на конкретном примере дают понятие о колебательном контуре и возникновении в нем колебаний.

Для демонстрации электромагнитных колебаний собирают установку по схеме, показанной на рисунке 13.1. Периоды колебаний стрелки и контура должны быть одного порядка. Широко распространенной ошибкой является показ опыта без соответствующего подбора значений L и C. Этот опыт всегда «получается», поскольку стрелка гальванометра действительно приходит в колебание от первого импульса тока в контуре, но совершает колебания с собственной частотой, не успевая вследствие своей значительной инертности следовать за колебаниями в кон-

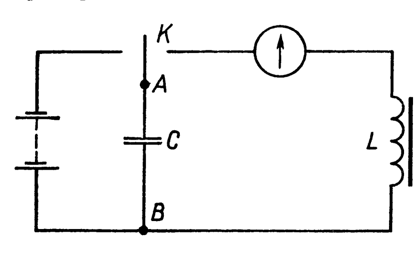


Рис. 13.1

туре, которые, как правило, имеют несравненно бо́льшую частоту.

При использовании батареи конденсаторов емкостью $C = 60$ мкФ для получения колебаний с периодом $T = 0{,}2$ с, как следует из формулы Томсона, нужно взять катушку с индуктивностью $L \approx 16$ Гн.

Такой индуктивностью обладают две дроссельные катушки большой индуктивности, соединенные последовательно и надетые на замкнутый железный сердечник от универсального трансформатора. Гальванометр присоединяют к клеммам однослойной обмотки, навитой сверху дроссельной катушки. При этом лучше использовать гальванометр от демонстрационного амперметра с внутренним сопротивлением 385 Ом. Это сопротивление ближе к сопротивлению «генератора», т. е. сопротивлению обмотки, где создается переменная ЭДС, и потому гальванометр будет отбирать от нее наибольшую мощность.

Напряжение анодной батареи или кенотрона ($U \approx 100$ В) подбирают так, чтобы при первом импульсе тока стрелка гальванометра отклонялась на всю шкалу, не ударяясь об упоры.

Изменяя индуктивность L (используют сначала две, а затем одну катушку) и емкость C конденсатора, показывают зависимость периода электромагнитных колебаний T от этих величин.

Наглядным вариантом опыта может также служить следующий.

Стрелку прибора с помощью корректора переводят, например, на правый край шкалы и подбирают период колебаний контура таким, чтобы он был в несколько раз меньше периода собственных колебаний стрелки. При первом импульсе тока стрелка отклоняется влево на всю шкалу, а затем под действием пружин начинает возвращаться вправо. Однако под действием электромагнитных колебаний почти посредине шкалы стрелка снова отклоняется влево, и так несколько раз.

Достоинство этого варианта опыта заключается в том, что здесь собственные механические колебания наглядно «отделяются» от электромагнитных.

Колебания рассматривают в основном с энергетической точки зрения. При этом, повторяя сведения, известные учащимся из курса физики IX класса, следует пояснить, что аналогом механической потенциальной энергии является энергия электрического поля, например конденсатора. Это поле, как и гравитационное поле Земли, потенциальное. Его энергетической характеристикой служит потенциал (или разность потенциалов). Кинетическую же энергию, обусловленную движением тела, следует сопоставить с энергией магнитного поля, которая связана с движением зарядов или током. Дальнейшей аналогией является аналогия энергетических превращений в конденсаторе и маятнике, лучше пружинном. В пружинном маятнике «наглядным» носителем потенциальной энергии служит деформированная пружина, а носителем кинетической энергии — колеблющееся тело. Аналогами в колебательном контуре соответственно являются заряженный конденсатор и катушка с током.

При замыкании конденсатора на катушку индуктивностью L (см. рис. 13.1) в последней возникает электрический ток и, следовательно, магнитное поле. Согласно закону сохранения энергия конденсатора убывает, а энергия магнитного поля на столько же увеличивается. В тот момент, когда энергия конденсатора становится равной нулю, энергия магнитного поля достигает максимума $\left(W_м = \frac{LI^2}{2}\right)$.

Механической аналогией служит полное превращение потенциальной энергии пружины в кинетическую энергию колеблющегося тела $\left(W_k = \frac{mv^2}{2}\right)$. Из сопоставления формул следует, что аналогом индуктивности L является масса m, а аналогом силы тока I — скорость тела v.

Но так как $v = x'$, а $I = q'$, то *для колебательного процесса в контуре аналогом смещения x служит заряд q.*

В таком случае из трех известных учащимся формул энергии заряженного конденсатора:

$$W_p = \frac{qU^2}{2}; \ W_p = \frac{CU^2}{2}; \ W_p = \frac{q^2}{2C}$$

аналогом формулы $\frac{kx^2}{2}$ является последняя, а не вторая формула, как можно было бы предположить по ее виду. Поэтому и аналогом коэффициента k служит величина, обратная электроемкости, т. е. $\frac{1}{C}$.

Из энергетических соображений далее следует, что конденсатор должен перезарядиться и процесс будет повторяться: в контуре возникнут электромагнитные колебания.

Если позволяет время, полезно более обстоятельно рассмотреть колебания и с электродинамической точки зрения.

Под действием электростатических сил поля конденсатора электроны приходят в упорядоченное ускоренное движение, которое будет таковым до тех пор, пока не разрядится конденсатор. В этот момент скорость электронов станет максимальной, хотя на них уже не будут действовать электростатические силы. Окажется максимальным и ток $I = jS = envS$. При дальнейшем движении электронов начинается перезарядка конденсатора. Электростатические силы тормозят движение электронов, и ток уменьшается, что, в свою очередь, приводит к ослаблению магнитного поля.

По закону Ленца в проводнике возникает ЭДС самоиндукции, которая препятствует уменьшению тока. Ток будет течь еще некоторое время в прежнем направлении, что и приведет к перезарядке конденсатора. Далее процесс пойдет аналогичным образом с той разницей, что направление тока изменится на противоположное.

Сопоставляя колебания электронов и груза на пружине, следует предостеречь учащихся от буквального понимания электро-

магнитных колебаний в том смысле, что те электроны, которые были на одной обкладке конденсатора, перейдут через промежуток времени $t = \frac{T}{2}$ на другую обкладку, подобно тому как маятник переходит из крайнего левого положения в крайнее правое. Согласно формуле $j = env$ скорость электронов v составляет доли сантиметров в секунду. И они только колеблются около некоторых положений равновесия с весьма небольшой амплитудой. Более верной в этом смысле является аналогия с колебанием воды в сообщающихся сосудах (рис. 13. 2), где каждая частица совершает колебания около некоторого положения равновесия.

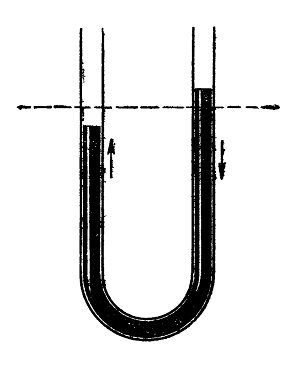


Рис. 13.2

2. УРАВНЕНИЕ СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Следуя принятой методике рассмотрения прежде всего энергетических превращений в контуре, уравнение свободных электромагнитных колебаний можно вывести, как это сделано в учебнике «Физика-10», исходя из закона сохранения энергии.

В любой момент времени, если пренебречь потерями, полная энергия контура $E = \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C} = \text{const}$; $E' = 0$. Следовательно, $q'' = -\frac{1}{LC}q$.

Вывод уравнения электромагнитных колебаний в контуре возможен и на основе электродинамических соотношений.

В колебательном контуре при $R \approx 0$ ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_{is} = -Li'$ всегда равна и противоположна по знаку напряжению на конденсаторе $U = \frac{q}{C}$. Следовательно,

$$-Li' = \frac{q}{C} \text{ или } q'' = -\frac{1}{LC}q. \quad (1)$$

С математической точки зрения уравнение (1) отличается от уравнения для гармонических колебаний

$$x'' = -\frac{k}{m}x \quad (2)$$

только обозначением переменных и постоянных величин. Это позволяет еще раз подтвердить аналогичность соответствующих величин, установленную ранее, и заключить, что заряд на обкладках конденсатора изменяется со временем по закону косинуса или

синуса

$$q = q_{max} \cos \omega t \text{ или } q = q_{max} \sin \omega t.$$

Для обобщения и закрепления материала величины-аналоги полезно занести в таблицу [12, с. 37]. При этом следует обратить внимание на фазовое соотношение величин:

$$q = q_{max} \cos \omega t; \; q' = I = q_{max} \omega \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right),$$

$$\mathscr{E}_{is} = -Lq'' = -LI' = -Lq_{max} \omega \cos(\omega t + \pi).$$

Для уяснения этих соотношений следует использовать графики, подобные графикам, показанным на рисунке 12.9, а также аналогию колебаний маятника и электромагнитных колебаний в контуре.

Используя аналогию соответствующих величин, выводят также формулу Томсона. Для механических упругих колебаний $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$. Аналогом m будет L, а аналогом k — $\frac{1}{C}$. Поэтому $T = 2\pi\sqrt{LC}$.

Для закрепления материала и подготовки к изучению следующих тем полезно решить задачи [27, № 736—740].

3. ВЫНУЖДЕННЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ. ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

Логическим переходом к новой теме служит обсуждение вопроса о неизбежных потерях энергии свободных колебаний в контуре и их быстром затухании. По аналогии с механическими колебаниями нетрудно заключить, что для получения незатухающих электромагнитных колебаний необходимо компенсировать потери энергии в контуре. Это можно сделать, пополняя энергию периодически, лучше всего в резонансном режиме.

После этого, рассматривая вращение рамки в магнитном поле (рис. 13.3), поясняют принцип получения синусоидального тока.

Пронизывающий рамку магнитный поток $\Phi = |\vec{B}| S \cos \omega t$ и $\mathscr{E}_i = -\Phi'$.

Следовательно,

$$\mathscr{E}_i = |\vec{B}| S\omega \sin \omega t = \Phi_{max} \omega \sin \omega t = \mathscr{E}_{max} \sin \omega t.$$

Под действием синусоидальной ЭДС ток в цепи также изменяется по синусоидальному закону, но в общем случае отличается от ЭДС по фазе: $i = I_{max} \sin(\omega t + \varphi)$.

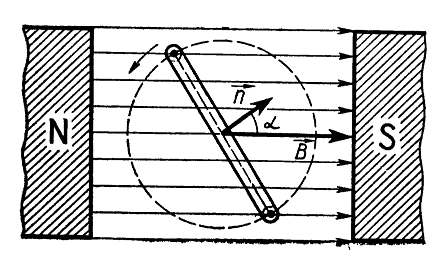


Рис. 13.3

Получение переменного тока следует продемонстрировать с помощью рамки с кольцами, вращающейся в магнитном поле, или с помощью магнитоэлектрической машины. Переменный ток в рамке обнаруживают демонстрационным магнитоэлектрическим вольтметром, а ток, созданный магнитоэлектрической машиной, полезно исследовать с помощью электронного осциллографа. (Некоторое отличие осциллограммы от синусоиды объясняется неоднородностью магнитного поля машины.) После этого получают осциллограмму переменного тока от сети. Осциллограмму нужно зарисовать на доске и в тетрадях учащихся, проанализировать и использовать при изучении последующего материала.

4. ДЕЙСТВИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. ДЕЙСТВУЮЩИЕ ЗНАЧЕНИЯ СИЛЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

Используя и обобщая известные учащимся сведения из курсов физики VII и IX классов, вначале с помощью опытов дают представление о некоторых специфических свойствах переменного тока в сравнении с током постоянным (рис. 13.4). Многие действия постоянного и переменного токов различны. И только отличием тепловых действий постоянного и переменного токов за длительный промежуток времени можно пренебречь. На этом основании вводят понятие действующего значения силы переменного тока, равного силе такого постоянного тока, который в течение одинакового времени выделяет в цепи такую же энергию, что и переменный ток.

Используя это определение, установим зависимость между действующим и амплитудным значениями переменного тока.

Для этого найдем выражения для равных энергий, выделяемых переменным и постоянным током за одинаковое время, например за период переменного тока T.

Для постоянного тока $W = I^2Rt$. Сила тока I как раз равна действующему значению переменного тока, выделяющего за время T такую же энергию W. Для переменного тока, поскольку сила тока $i = I_{max} \cos \omega t$ — величина переменная, выделяемую энергию по аналогичной формуле можно найти только для бесконечно малого промежутка времени dt:

$$dW = i^2Rdt = I_{max}^2 R \cos^2 \omega t dt.$$

Для промежутка времени T значение W может быть получено вначале средствами элементарной математики [12, § 23], а затем, при повторении, когда учащиеся изучат по математике тему «Первообразная и интеграл»[1], — с помощью интегрирования. Соответст-

[1] См.: Алгебра и начала анализа /Под ред. А. Н. Колмогорова. Учебное пособие для 10 класса средней школы. М., 1977.

Постоянный ток	Сравнение действий постоянного и переменного тока	Переменный ток
а	Тепловые действия одинаковы: накаливание волоска электрической лампочки может быть вызвано как переменным током, так и постоянным.	
б	Электромагнитные действия неодинаковы: катушка с железным сердечником притягивает железные и не притягивает медные кольца. При использовании переменного тока кольца „висят" в воздухе.	
в	Трансформатор не работает на постоянном, но работает на переменном токе.	
г	Конденсатор не пропускает постоянный, но пропускает переменный ток.	
д	Химические действия тока неодинаковы: при электролизе раствора медного купороса постоянный ток вызывает выделение меди на аноде; при пропускании через тот же раствор переменного тока выделение меди незаметно.	
е	У неоновой лампы, включенной в цепь постоянного тока, светится один электрод, при переменном токе-попеременно оба электрода.	
ж	В электрической дуге, питаемой постоянным током, скорее сгорает электрод, соединенный с положительным полюсом источника тока. При переменном токе оба электрода сгорают одновременно.	

Рис. 13.4

вующие расчеты могут быть также выполнены на уроках математики.

$$W = \int_0^T I^2_{max} R \cos^2 \omega t dt,$$

$$\cos^2\omega t = 1 + \cos 2 \omega t.$$

Поэтому

$$W = \frac{I^2_{max}R}{2} \int_0^T (1 + \cos 2\omega t)\, dt = \frac{I^2_{max}R}{2} T.$$

Согласно определению действующего значения переменного тока

$$\frac{I^2_{max}R}{2} T = I^2RT, \text{ отсюда } I = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}.$$

Формулу для действующего значения напряжения и ЭДС вводят по аналогии с формулой для силы тока:

$$U = \sqrt{\overline{U^2}} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}}; \ \mathcal{E} = \sqrt{\overline{\mathcal{E}^2}} = \frac{\mathcal{E}_{max}}{\sqrt{2}}.$$

Амперметры и вольтметры переменного тока градуируют на действующее значение измеряемых величин. Приборы электромагнитной системы применяют для измерения как постоянного, так и переменного тока. Но обычно градуировка их шкал для переменного и постоянного тока различна. Очевидно, что отклонение подвижной системы приборов переменного тока не должно зависеть от изменения его направления в течение периода. По этой причине магнитоэлектрические приборы для измерения переменного тока (без дополнительных приспособлений — выпрямителей) не применяются. В кабинете желательно иметь образцы электроизмерительных приборов в разобранном виде, смонтированные на панелях, что позволяет познакомить учащихся с их конструктивными особенностями.

Рассматривая шкалу прибора, устанавливают, какую величину (силу тока или напряжение) он измеряет, в каких применяется цепях (для переменного или постоянного тока), какова система прибора, пределы измерения, класс точности, каковы указания относительно установки прибора (в горизонтальном или вертикальном положении).

5. АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Под действием синусоидальной ЭДС электроны совершают вынужденные колебания. Эти колебания электронов, в результате которых они в течение каждого полупериода приобретают упорядоченное движение, аналогичны упорядоченному движению элек-

тронов в цепи постоянного тока. Следовательно, переменный ток тоже должен испытывать некоторое сопротивление в проводнике и нагревать его. Опыт (см. рис. 13.4, *а*) наглядно подтверждает это.

Сопротивление, в котором электрическая энергия необратимо превращается во внутреннюю энергию проводника, называют активным[1].

При активном сопротивлении цепи сдвига фаз между током и напряжением не происходит: изменения силы тока пропорциональны изменению напряжения. (Этот факт нетрудно показать на опыте с помощью двухлучевого осциллографа.)

Таким образом, в цепи с активным сопротивлением для мгновенных значений силы тока и напряжения оказывается справедливым закон Ома:

$$i = \frac{U}{R}.$$

Но так как $i = I_{max} \cos \omega t$, а $u = U_{max} \cos \omega t$, то закон Ома можно записать также с помощью амплитудных и действующих значений силы тока и напряжения:

$$I_{max} = \frac{U_{max}}{R}; \quad I = \frac{U}{R}.$$

6. ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ЕМКОСТЬЮ

Изложение материала можно начать с постановки или обсуждения ранее показанного проблемного опыта (см. рис. 13.4, *г*). Существование тока в цепи объясняют перезарядкой конденсатора. К одной пластине, например *1* (рис. 13.5), заряды Δq за время Δt приходят, а от пластины *2* уходят. Это эквивалентно переносу заряда внутри конденсатора от пластины *1* к пластине *2*. Таким образом, конденсатор не разрывает цепь переменного тока. Поскольку же пластины конденсатора соединены с клеммами генератора проводниками, сопротивлением которых можно пренебречь, то напряжение на пластинах *1*, *2* то же, что и на клеммах *3*, *4*: $u_C = u = \frac{q}{C}$.

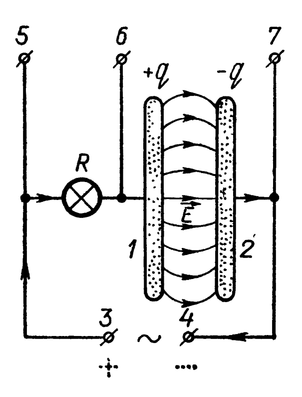
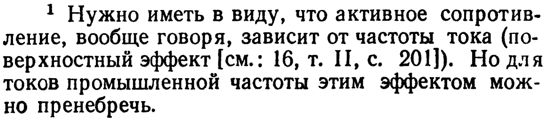


Рис. 13.5

Допустим, что напряжение генератора изменяется по закону $u = U_{max} \cos \omega t$. Тогда $q = Cu = CU_{max} \cos \omega t$;

$$i = q' = U_{max} \omega C \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)^2.$$



[1] Нужно иметь в виду, что активное сопротивление, вообще говоря, зависит от частоты тока (поверхностный эффект [см.: 16, т. II, с. 201]). Но для токов промышленной частоты этим эффектом можно пренебречь.

[2] По существу, i — это ток смещения в конденсаторе.

Следовательно, в цепи с емкостным сопротивлением ток i опережает по фазе напряжение u на $\frac{\pi}{2}$.

Величина ωC аналогична проводимости, а величина $\frac{1}{\omega C}$, как это следует из сравнения с законом Ома для постоянного тока, играет роль сопротивления. Переходя к действующим значениям силы тока и напряжения, закон Ома для цепи переменного тока с емкостью можно записать в виде

$$I = \frac{U}{X_C} = U\omega C.$$

Для объяснения явления обращают внимание на то, что заряды конденсатора создают во внешней цепи электрическое поле, напряженность которого $\vec{E}_{ст}$ противоположна по направлению напряженности $\vec{E}_э$ электрического поля генератора. Поэтому $\varphi_2 - \varphi_1 = -U$.

Допустим, что вначале конденсатор не заряжен. Тогда растущее по синусоидальному закону даже очень малое вначале напряжение создает большой ток. Когда же напряжение сети возрастет, на конденсаторе уже накопятся значительные заряды и возникнет разность потенциалов, препятствующая перемещению зарядов. Ток уменьшится.

При максимальном значении напряжения сети будет максимальным и напряжение на конденсаторе. Ток в цепи станет равным нулю. Таким образом, ток опережает напряжение сети по фазе на $\frac{\pi}{2}$.

Для показа сдвига фаз между током и напряжением лучше всего использовать двухлучевой осциллограф. Можно взять также однолучевой осциллограф в соединении с электромеханическим или электронным коммутатором [57, ч. 2, опыт 19].

При отсутствии коммутатора можно рекомендовать следующий упрощенный вариант опыта. Экран осциллографа закрывают прозрачной пленкой. Напряжение с клемм *5*, *6* (см. рис. 13.5) подают на осциллограф и получают на экране синусоиду, которую рассматривают как график силы тока, поскольку фазы колебаний силы тока одинаковы во всех последовательно соединенных участках цепи и совпадают с фазой напряжения на активном сопротивлении R. Кривую обводят на пленке, использовав для этого фломастер. Затем к осциллографу присоединяют клеммы *6*, *7* и обнаруживают разность фаз между напряжением на конденсаторе и силой тока. При $R \ll \frac{1}{\omega C}$ разность фаз близка к $\frac{\pi}{2}$.

Зависимость сопротивления $X_C = \frac{1}{\omega C}$ от емкости C демонстрируют, используя конденсатор переменной емкости. Зависимость

от частоты переменного тока показывают, подключив цепь к звуковому генератору (в этом случае индикатором тока служит лампа от карманного фонаря на 2,5—3,5 В).

Наконец, внимание учащихся обращают на то, что конденсатор в цепи переменного тока не поглощает энергии. В течение первой четверти периода конденсатор получает от генератора столько же энергии $\left(W_C = \frac{CU^2}{2}\right)$, сколько отдает в течение второй четверти периода, и т. д.

7. ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ИНДУКТИВНОСТЬЮ

Изложение темы также можно начать с постановки проблемного опыта, заменив в схеме (см. рис. 13.5) конденсатор катушкой индуктивности. Лампа на 127(220) В, подключенная к источнику постоянного тока последовательно с катушкой индуктивностью L, например, от разборного школьного трансформатора, светит ярко, а при подключении к источнику переменного тока такого же действующего напряжения светит с меньшим накалом или даже не светит совсем. Явление объясняют аналогично тому, как это делалось для конденсатора.

При изменении тока $i = I_{max} \cos \omega t$ в катушке индуктивностью L возникает вихревое электрическое поле, напряженность которого $\vec{E}_i$ согласно правилу Ленца направлена противоположно напряженности электрического поля генератора $\vec{E}_э$: $\vec{E}_i = -\vec{E}_э$. Следовательно, ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_{is} = -u$ или $u = -\mathcal{E}_{is} = -(-Li') = \omega LI_{max}\left(\cos \omega t + \frac{\pi}{2}\right)$. Напряжение опережает по фазе ток в катушке индуктивности на $\frac{\pi}{2}$.

Величину ωLI_{max} можно считать амплитудным значением напряжения u, а величину ωL по аналогии с законом Ома для цепи постоянного тока — индуктивным сопротивлением X_L. Тогда $I_{max} = \frac{U_{max}}{\omega L}$. Поскольку $I_{max} = \sqrt{2}I$, а $U_{max} = \sqrt{2}\,U$, то это соотношение справедливо и для действующих значений силы тока и напряжения:

$$I = \frac{U}{\omega L} = \frac{U}{2\pi\nu L}.$$

Зависимость сопротивления X_L от индуктивности L демонстрируют, изменяя в катушке положение железного сердечника и включая различное число ее витков. Зависимость X_L от частоты переменного тока ν показывают, подключив цепь к звуковому генератору.

В заключение поясняют, что индуктивное сопротивление так же, как емкостное, не потребляет энергии в цепи переменного то-

ка: энергия $\left(W_{м} = \frac{LI^2}{2}\right)$, полученная катушкой в течение одной четверти периода, возвращается генератору в течение другой четверти.

8. ОБЩИЙ СЛУЧАЙ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В рассмотренных выше идеальных случаях цепи ей приписывалось какое-либо одно сопротивление: активное, индуктивное или емкостное, что имеет смысл лишь в том случае, когда все остальные виды сопротивления играют незначительную роль по сравнению с избранным. Однако фактически любой участок цепи обладает всеми видами сопротивления, и это часто необходимо учитывать. Вывод соответствующих зависимостей между напряжением, силой тока и сопротивлением для полной цепи требует сложения гармонических колебаний с одинаковым периодом, что выходит за рамки программы по физике. При работе же с отдельными, интересующимися физикой, учащимися могут быть использованы следующие методы.

1. Аналитический метод, при котором используются известные учащимся из курса математики IX класса формулы суммы одноименных тригонометрических функций.

2. Метод векторных диаграмм. Применение этого наиболее удобного в данном случае способа подробно описано в методической литературе [68], в учебнике физики для X класса [12, § 26], а также в учебнике по математике, где специально рассматривается вопрос о сложении гармонических колебаний с общим периодом.

Для формирования понятия о геометрическом сложении напряжений на последовательно соединенных участках цепи переменного тока полезно вначале поставить проблемный опыт, показав, что общее напряжение в цепи (см. рис. 13. 5), измеряемое вольтметром, присоединенным к клеммам *5*, *7*, не равно алгебраической сумме напряжений на конденсаторе и лампе. При этом сопротивления R и X_C желательно подобрать такими, чтобы $R \approx X_C$.

На числовых примерах, взятых из опыта, следует показать, что $U^2 = U_R^2 + U_C^2$ или $U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2}$.

Данная формула наводит на мысль о том, что графически напряжение на активном и емкостном сопротивлении можно изобразить в виде взаимно перпендикулярных векторов, а общее напряжение U должно находиться как их геометрическая сумма (рис. 13.6).

Но $U = IZ_{RC}$, где Z_{RC} — общее сопротивление цепи. Поэтому $I^2Z_{RC}^2 = I^2R^2 + I^2\frac{1}{\omega^2C^2}$. Отсюда

$$Z_{RC} = \sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2C^2}}.$$

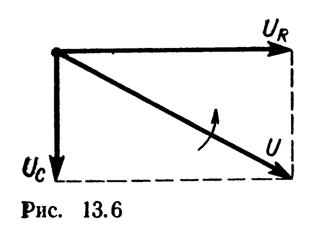


Рис. 13.6

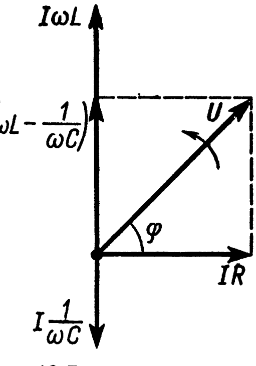


Рис. 13.7

Заменив в схеме (см. рис. 13.5) конденсатор катушкой индуктивности, аналогично из опыта находим, что $U^2 = U_R^2 + U_L^2$ и $Z_{RL} = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$.

Векторная диаграмма для полной цепи имеет вид, показанный на рисунке 13.7. Из рисунка видно, что

$$U^2 = U_R^2 + (U_L - U_C)^2;\ I^2Z^2 = I^2R^2 + I^2\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2.$$

Откуда

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

Мгновенное значение силы тока в цепи, как уже известно учащимся, определяется формулой $i = I_{max} \cos(\omega t + \varphi)$. Векторная диаграмма (см. рис. 13.7) показывает, что

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}.$$

9. МОЩНОСТЬ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Участки цепи переменного тока с конденсатором и катушкой индуктивности, как уже было рассмотрено выше, не потребляют энергию.

Используя формулу для мгновенной мощности $p = ui$, а также графики, подобные приведенным на рисунке 12.9, следует показать, что в течение одной четверти периода конденсатор и катушка потребляют столько же энергии, сколько отдают в течение следующей четверти периода [12, рис. 47].

В общем случае мгновенная мощность переменного тока

$$p = ui = I_{max}\, U_{max} \cos \omega t \cdot \cos(\omega t + \varphi),$$

где φ — сдвиг фаз между током и напряжением.

Тригонометрические преобразования и нахождение среднего за период значения полученных величин дают следующее выражение [12, § 27]:

$$P = \bar{p} = UI \cos\varphi.$$

По данной формуле вычисляют активную мощность, т. е. мощ-

ность, определяемую той частью энергии генератора, которая необратимо переходит непосредственно во внутреннюю энергию проводников в результате их нагревания или же переходит во внутреннюю энергию благодаря изменяющемуся магнитному полю (механическая работа, токи Фуко).

Далее следует обстоятельно выяснить физический смысл и значение коэффициента мощности — $\cos\varphi$.

Следует предупредить нередкую ошибку учащихся, смешивающих разные физические величины: коэффициент мощности ($\cos\varphi$) и коэффициент полезного действия (КПД). Коэффициент мощности ($\cos\varphi$) показывает, какая часть электрической энергии превращается необратимо во внутреннюю или механическую энергию и в какой мере используется силовая установка, приводящая в действие генератор (паровая турбина, гидротурбина, дизель и др.), а КПД характеризует ту часть выработанной электроэнергии, которая используется полезно в тех или иных целях, например для нагревания.

Для цепи только с емкостным или индуктивным сопротивлением $\varphi = \frac{\pi}{2}$, $\cos\varphi = 0$ и $P = 0$. А для цепи с активным сопротивлением $\varphi = 0$ и $\cos\varphi = 1$.

Электрические машины, например генераторы и трансформаторы, так же как и линии электропередач, рассчитаны на определенное номинальное (максимально допустимое) значение силы тока и напряжения. При $\cos\varphi = 1$ генератор отдает в цепь максимальную мощность $P = I_н U_н$. Допустим теперь, что при тех же значениях $I_н$ и $U_н$ $\cos\varphi = 0{,}5$. Это значит, что генератор отдает потребителю только половину той энергии, которую способен вырабатывать. Но сила тока $I_н$ в генераторе и в сети, а следовательно, и потери на нагревание будут максимальными, что отрицательно скажется на КПД всей энергетической системы.

Для того чтобы при $\cos\varphi = 0{,}5$ и принятом напряжении $U_н$ подать потребителю полную мощность P, нужно вдвое увеличить силу тока. Но увеличение силы тока в 2 раза согласно закону Джоуля — Ленца $W = I^2Rt$ вызывает увеличение в 4 раза потерь энергии на нагревание. Следовательно, коэффициент мощности ($\cos\varphi$) оказывает влияние на КПД электропередач переменного тока в том смысле, что с увеличением $\cos\varphi$ уменьшается доля энергии, напрасно потерянной в электрических машинах и линиях электропередач по сравнению с полной энергией, которую вырабатывает генератор.

Для промышленных предприятий минимальный $\cos\varphi = 0{,}85$. Повышение $\cos\varphi$ в энергосистемах страны даже на доли процента может дать экономию в сотни миллионов киловатт-часов электроэнергии.

Дальнейшая задача — показать, как можно повысить $\cos\varphi$ в полной электрической цепи. $\cos\varphi = \frac{P}{UI}$. Если вся энергия

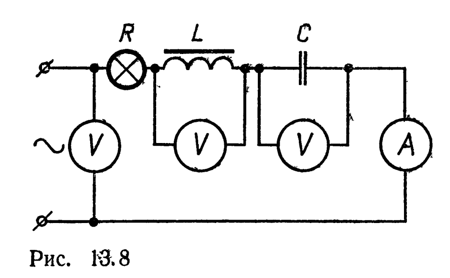


Рис. 13.8

в цепи идет на нагревание, то $\cos\varphi = \frac{I^2R}{UI} = \frac{IR}{U} = \frac{R}{Z}$, где Z — полное сопротивление цепи.

Следовательно, $\cos\varphi = \frac{R}{Z} =$

$$= \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}.$$

Увеличение $\cos\varphi$ возможно за счет уменьшения Z. $\cos\varphi = 1$ при условии $\omega L = \frac{1}{\omega C}$.

Поскольку $\cos\varphi$ часто обусловлен значительным индуктивным сопротивлением, прибегают к включению в цепь конденсаторов. Так, например, параллельно электродвигателям подключают конденсаторы.

В заключение крайне желательно познакомить учащихся с ваттметром, поворот подвижной системы которого пропорционален величинам I, U, $\cos\varphi$ и, следовательно, мощности P. Используя ваттметр, вольтметр и амперметр, полезно найти $\cos\varphi$, например, для цепи, показанной на рисунке 13.8.

Заметим, что величину $S = IU$ называют полной мощностью и измеряют в вольт-амперах (В · А) или киловольт-амперах (кВ · А). Номинальная полная мощность, выраженная в киловольт-амперах, указывается, например, в паспортах генераторов тока и трансформаторов.

10. ЛАМПОВЫЙ ГЕНЕРАТОР

Наряду с переменным током промышленной частоты $\nu = 50$ Гц в технике, медицине, различных областях научных исследований и т. д. все большее значение приобретает использование токов высокой частоты ввиду ряда их специфических свойств.

В технике до частоты 10 кГц переменные токи получают с помощью машинных генераторов, а для получения бóльших частот используют ламповые генераторы.

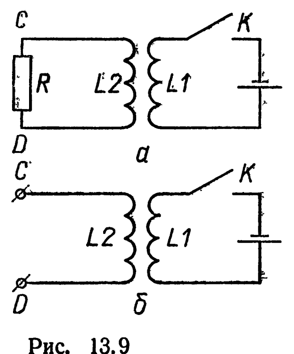


Рис. 13.9

До изучения принципа действия лампового генератора необходимо ознакомить учащихся с устройством трехэлектродной лампы (триода). Опираясь на полученные учащимися в IX классе знания о диоде, демонстрируют и объясняют действие сетки и усилительное действие лампы [57, т. 2, изд. 2, опыты 48 и 49].

Для облегчения последующего понимания десятиклассниками принципа обратной связи в ламповом генераторе следует решить такую задачу:

Определить направление индукционного тока, возникающего в катушке индуктивностью L_2 (рис. 13.9, *а*), при замыкании ключа *К* в цепи с катушкой индуктивностью L_1. Какой потенциал (положительный или отрицательный) будут иметь точки *С* и *D* в момент замыкания ключа, если выключить резистор *R* (рис. 13.9, *б*)?

Изучение лампового генератора следует начать с показа опытов [57, ч. 2, опыт 23], а затем рассмотреть теоретические вопросы.

Для опыта (рис. 13.10) используют дроссельную катушку *1* и катушку *2* от универсального трансформатора на 220 В, надетые на железный сердечник, батарею конденсаторов переменной емкости на 58 мкФ и радиолампу 6 Н7С (со сдвоенными электродами). В качестве индикатора колебаний применяют гальванометр, а также электронный осциллограф и громкоговоритель.

Генератор рассматривают как автоколебательную систему, обращая внимание при объяснении его действия на «обратную связь». Объяснению помогает аналогия с маятником в механических или первичных электрических часах.

Собственно колебательной системой во всех генераторах является колебательный контур, а регулирующим устройством — трехэлектродная лампа.

Для определенности рассмотрим простейшую принципиальную схему [12, рис. 55] с колебательным контуром в анодной цепи и индуктивной (трансформаторной) обратной связью. Учащимся из опытов известно (см. рис. 13.1), что колебания в контуре затухают. Но переключая ключ в такт колебаниям в контуре, в принципе можно было бы все время восполнять потери энергии и сделать колебания незатухающими. Практически это достигается с помощью трехэлектродной лампы, которая служит своеобразным автоматическим ключом. Принцип действия лампы и обратной связи также целесообразно сначала объяснить в общих чертах: катушка

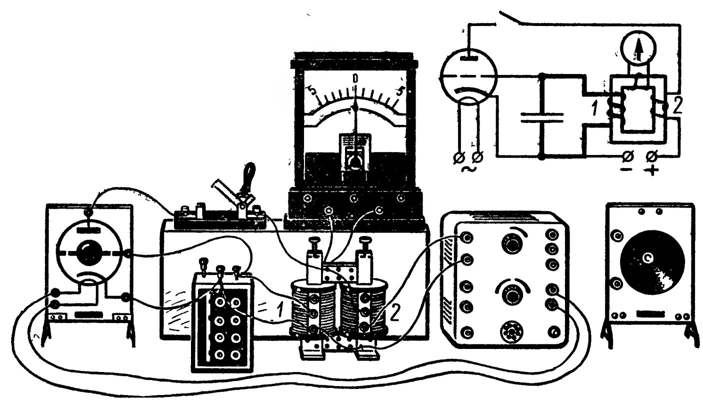


Рис. 13.10

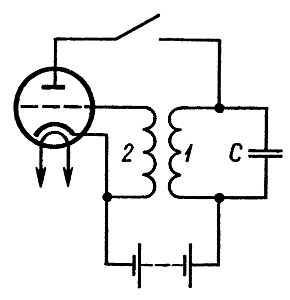


Рис. 13.11

обратной индуктивной связи является как бы вторичной катушкой трансформатора. В ней наводится в такт колебаниям в контуре переменная ЭДС. «Сетка заряжается то положительно, то отрицательно по отношению к катоду... Лампа то «отпирается», то «запирается», «толчки» анодного тока действуют на контур в нужные моменты...» [21, с. 89].

После этого действие обратной связи можно рассмотреть подробней. При замыкании ключа (рис. 13.11) в анодной цепи потечет ток и конденсатор зарядится. Благодаря электрическим флуктуациям в контуре возникнут колебания небольшой амплитуды. Допустим, что по катушке *1* (индуктивность L) протекает ток, направленный вверх (по отношению к чертежу). Он содержит постоянную составляющую анодного тока и переменную составляющую, созданную колебательным контуром. Благодаря этой составляющей в катушке *2* (индуктивность L_C) наводится переменная ЭДС.

Рассмотрим первую четверть периода. Сила тока в катушке *1* увеличивается и в катушке *2* возникает ЭДС аналогично первому случаю рассмотренной выше задачи (см. рис. 13.9).

И если при этом сетка будет иметь положительный по отношению к катоду потенциал, то анодный ток еще более возрастет и колебательный контур получит порцию энергии. (Если же сетка будет заряжаться отрицательно, то нужно поменять местами концы катушки *2*.)

После перезарядки обкладок конденсатора и изменения направления тока в катушке *1* заряд сетки лампы изменится на противоположный и она будет заперта. Таким образом в катушке *2* возникают вынужденные гармонические колебания зарядов той же частоты, что и в контуре, управляющие анодным постоянным, но пульсирующим током, пополняющим энергию контура.

Изменяя индуктивность L и емкость C в колебательном контуре (рис. 13.11), наблюдают изменение частоты электромагнитных колебаний, вплоть до столь высоких, что стрелка гальванометра уже не успевает в силу большой инертности следовать за ними. Об увеличении частоты свидетельствует более узкая синусоида на экране осциллографа и более высокий звук, издаваемый громкоговорителем.

ГЛАВА 14

ПРОИЗВОДСТВО, ПЕРЕДАЧА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Материал темы имеет ярко выраженную политехническую направленность. В ней дается понятие о технических генераторах переменного тока, трансформаторах, передаче и использовании электрической энергии. Большое воспитательное и политехническое значение имеют также сведения об успехах и перспективах электрификации СССР.

Приводим примерное поурочное планирование темы:

1-й урок. Генерирование электрической энергии.
2-й урок. Генератор переменного тока.
3-й урок. Трансформатор.
4-й урок. Передача электрической энергии.
5-й урок. Решение задач.
6-й урок. Электрификация СССР.

1. ГЕНЕРИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Данный материал служит введением в тему и призван обобщить имеющиеся у учащихся сведения о различных способах получения электрической энергии и ее достоинствах.

Электрическая энергия может быть получена (генерирована) за счет любого другого вида энергии. В этой связи следует продемонстрировать и кратко пояснить принцип действия, область применения, достоинства и недостатки следующих генераторов.

1. Химические источники тока (гальванические батареи, аккумуляторы). Одно из их главных достоинств — возможность использования как автономных источников электроэнергии. А недостаток — относительно небольшая энергоемкость и высокая стоимость электроэнергии.

2. Термоэлементы (термопара; термостолбик — рис. 14.1; полупроводниковый термоэлемент).

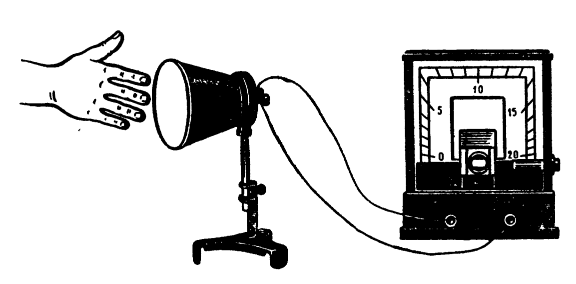


Рис. 14.1

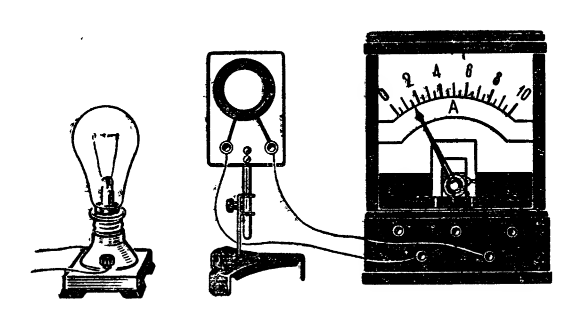


Рис. 14.2

3. Фотоэлементы (рис. 14.2) [57, ч. 1, опыт 163]. Примером данного вида генератора являются солнечные батареи спутников (рис. 14.3) и лунохода.

Одно из главных достоинств термо- и фотоэлементов — простой безмашинный способ получения электроэнергии. А одна из основных задач их усовершенствования — повышение КПД.

4. Электростатические генераторы. В школе примером генераторов такого рода является электрофорная машина, а в технике — генератор Ван-де-Граафа. Этот генератор способен создавать напряжение в несколько миллионов вольт, но из-за большого внутреннего сопротивления дает сравнительно небольшой ток. Используется для ядерных исследований.

5. Индукционные генераторы постоянного и переменного тока. Принцип их действия в общих чертах учащимся известен из курса физики VII, IX и X классов. Электромеханические индукционные генераторы переменного тока дают практически почти всю электроэнергию, которая используется в народном хозяйстве. Поэтому их обстоятельному изучению должен быть посвящен специальный урок. На вводном занятии могут быть упомянуты и другие разрабатывающиеся в настоящее время типы генераторов.

2. ГЕНЕРАТОР ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

На уроке кратко повторяют принцип получения синусоидальной ЭДС в рамке, вращающейся в магнитном поле (см. рис. 14.4). При этом для лучшего понимания работы генератора полезно решить следующую задачу:

Вычислить ЭДС, возникающую в одном витке якоря генератора, вращающегося с угловой скоростью ω.

Решение 1. ЭДС возникает только в проводниках длиной l_1 и l_2 (рис. 14.4, *а*), могущих пересекать линии магнитной индукции. $\mathscr{E}_l = |\vec{v}| \cdot |\vec{B}|\, l \sin\alpha$.

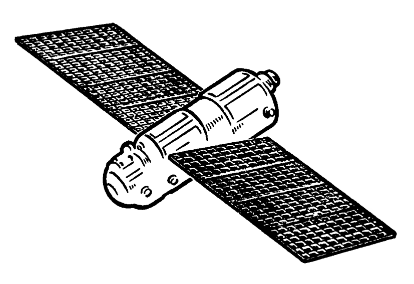


Рис. 14.3

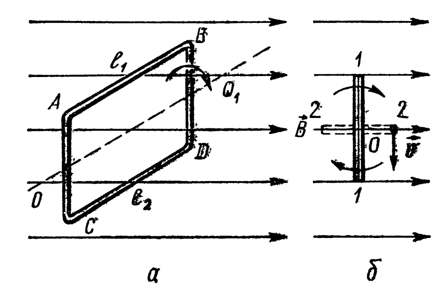


Рис. 14.4

В положении 1,1 (рис. 14.4, б) $\alpha = 0$ и $\mathscr{E}_i = 0$ (проводники движутся в этот момент вдоль линий магнитной индукции и не пересекают их). В положении 2,2 $\alpha = 90°$, ЭДС максимальна. Токи в проводниках AB и CD, как можно определить по правилу правой руки, текут в противоположных направлениях. Поэтому максимальная ЭДС индукции равна $\mathscr{E}_{max} = 2\,|\vec{v}| \cdot |\vec{B}|\,l$.

В других положениях мгновенное значение $\mathscr{E}_i = 2\,|\vec{v}| \cdot |\vec{B}|\,l \sin\alpha$.

Решение 2. $\mathscr{E}_i = -\Phi'$. $\Phi = |\vec{B}|\,S\cos\alpha$; $\alpha = \omega t$; $\omega = \frac{|\vec{v}|}{R}$; $S = 2Rl$.

$\mathscr{E}_i = -(|\vec{B}|\,S\cos\alpha)' = |\vec{B}|\,S\,\omega\sin\omega t = 2|\vec{v}|\cdot|\vec{B}|\,l\sin\omega t.$

Следовательно, ЭДС индукции $\mathscr{E}_i$ будет тем больше, чем длиннее активные проводники, больше скорость вращения и сильнее магнитное поле. На примере технического генератора или его модели (рис. 14.5) показывают, как перечисленные условия практически осуществляются в технике.

Генератор переменного тока должен иметь следующие основные части. Магнитную систему, создающую магнитное поле (индуктор машины). В мощных генераторах магнитное поле создается электромагнитами. Вращающаяся часть (ротор) содержит большое число витков. Для получения переменного тока заданного напряжения (и частоты) ротор вращается с определенной скоростью.

Генератор должен также иметь контактные кольца и щетки для подачи тока во внешнюю цепь. Стальные сердечники генератора для ослабления потерь энергии на токи Фуко набираются из отдельных пластин специальных сортов стали.

После этого с помощью схемы, например гидрогенератора (рис. 14.6), учащимся сообщают, что в генераторах значительной

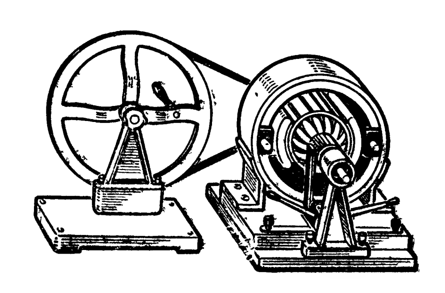


Рис. 14.5

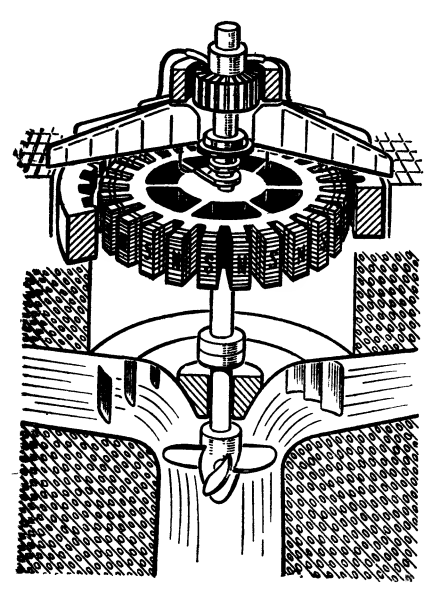


Рис. 14.6

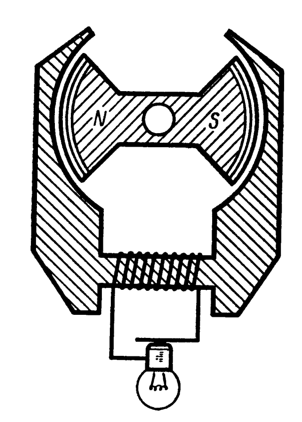


Рис. 14.7

мощности обмотка располагается в пазах неподвижной части машины—статора, который представляет собой полый цилиндр, изготовленный из специальной стали, а вращающейся частью (ротором) являются электромагниты. Примером простейшего генератора такого типа служит генератор карманного фонарика «Жучок», или «велодинамка» (рис. 14.7). Полезно также показать магнето трактора. Двухполюсные роторы имеют обычно генераторы тепловых электростанций, поскольку они приводятся в движение быстроходными паровыми турбинами. Сравнительно тихоходные гидротурбины приводят в движение генераторы с большим числом пар полюсов. Так, например, генераторы Братской ГЭС им. 50-летия Великого Октября имеют 24 пары полюсов, а Волжской ГЭС им. В. И. Ленина — 44 пары полюсов. Это позволяет при меньшей скорости вращения получить ЭДС заданной промышленной частоты (50 Гц).

3. ТРАНСФОРМАЦИЯ ТОКА. ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

В воспитательных и образовательных целях изучение темы полезно начать с рассказа об истории проблемы трансформации тока и передачи электроэнергии при высоком напряжении на значительные расстояния, в решение которой достойную лепту внесли отечественные физики и электромеханики [68, с. 69—70].

Необходимость повышения напряжения при передаче элект-

роэнергии по проводам на большие расстояния может быть объяснена следующим образом. Определенная мощность $P = IU$, отдаваемая генераторами в электросеть, может быть получена при малом токе I_1 и большом напряжении U_1 или же при большом токе I_2 и малом напряжении U_2.

Перед учащимися ставят вопрос, какой способ экономически целесообразнее. При решении этого вопроса рассуждают следующим образом.

В соответствии с законом Джоуля — Ленца $W = I^2Rt$ в линии электропередачи расходуется энергия на нагревание проводов. Поскольку в формулу входит квадрат силы тока, то уменьшение силы тока в линии электропередачи и лежит в основе уменьшения потерь энергии на нагревание проводов. Уменьшение же сопротивления R, приводящее при данном материале проводников к их утолщению, целесообразно и необходимо только в той мере, которая диктуется допустимой плотностью тока. Следовательно, в целях уменьшения потерь энергии в линиях электропередач необходимо использовать небольшую силу тока, но высокое напряжение. Повышение же напряжения (так же как и его понижение при последующей подаче тока потребителям) легче всего осуществить при переменном токе с помощью трансформаторов.

Принцип действия трансформаторов может быть объяснен так. Переменный электрический ток, проходящий по первичной обмотке трансформатора, создает переменный магнитный поток Ф, который порождает вихревое электрическое поле: $e_l = -\Phi'$.

При n_1 витках первичной и n_2 витках вторичной обмотки справедливы соотношения: $e_1 = -n_1 \Phi'$; $e_2 = -n_2\Phi'$.

Следовательно, чем больше число n_2 витков вторичной катушки, тем больше ЭДС, возникающая на ее концах.

Для демонстрации этого явления берут изолированный провод длиной 1—2 м и замыкают его концы на лампу от карманного фонаря. Затем навивают на сердечник трансформатора виток за витком, как показано на рисунке 14.8, и наблюдают постепенное увеличение накала нити лампы.

Следующая задача — обосновать целесообразность применения замкнутого магнитопровода. Для этого наблюдают едва заметное свечение лампы при разомкнутой магнитной цепи и ее яркое свечение, когда П-образный сердечник трансформатора замкнут ярмом. Увеличение ЭДС индукции объясняют уменьшением рассеяния магнитного потока.

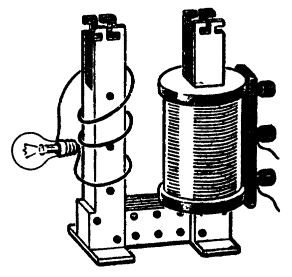


Рис. 14.8

При холостом ходе трансформатора (разомкнутой вторичной цепи) приложенное внешнее напряжение U_1 компенсирует падение напряжения на активном сопротивлении R и индуктивном сопротивлении Z_L обмотки.

Активное сопротивление обмотки трансформатора R мало, а индуктивное сопротивление ненагруженного трансформатора ωL велико. Сила тока $I_1 = \frac{U_1}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$ мала. Поэтому можно принять, что

$$U_1 \approx -e_i = n_1 \Phi'.$$

Таким образом, для холостого хода трансформатора, если не учитывать потери энергии на нагревание его обмоток (а также и потери энергии в стали и др.), можно записать: $\frac{U_1}{e_2} \approx \frac{n_1}{n_2} = k$, где k — коэффициент трансформации.

В паспортных данных (на щитках трансформаторов) коэффициент k указывается в виде отношения номинального высшего напряжения к низшему, например 6000/230.

Вторичная катушка играет для подключенной к ней нагрузки роль источника тока, ЭДС которого равна e_2. Пренебрегая потерей напряжения на самой вторичной обмотке трансформатора, можно записать, что $U_2 \approx e_2$, $k \approx \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{n_1}{n_2}$. Данное соотношение выполняется тем точнее, чем ближе режим работы трансформатора к холостому. Обычно считают, что с достаточным для практических целей приближением данное соотношение выполняется и при номинальных значениях U_1 и U_2.

Рассмотрим режим работы нагруженного трансформатора. По закону Ленца ток во вторичной катушке имеет такое направление, что созданный им магнитный поток препятствует изменению магнитного потока в магнитопроводе. Докажем, что это приводит к увеличению силы тока в первичной обмотке трансформатора.

Допустим, что мы рассматриваем такую четверть периода переменного тока, когда ток нарастает. Увеличивающийся магнитный поток индуцирует во вторичной обмотке ток такого направления, при котором его магнитная индукция $\vec{B}_2$ противоположна магнитной индукции $\vec{B}_1$ поля первичной катушки. В результате магнитный поток Φ в первый момент уменьшается. Уменьшается и ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_1$ в первичной катушке, а ток возрастает. Сила тока I_1 увеличивается до тех пор, пока суммарный магнитный поток Φ не станет равен магнитному потоку при холостом ходе.

Следовательно, увеличение силы тока I_2 во вторичной катушке автоматически приводит к увеличению силы тока I_1 в первичной катушке. Соответственно увеличивается потребляемая первой катушкой мощность $P_1 = I_1 U_1 \cos \varphi_1$ и мощность P_2, которая отдается вторичной катушкой нагрузке ($P_2 = I_2 U_2 \cos \varphi_2$). Это желательно показать на опыте, замкнув вторичную катушку на резистор сопротивлением R (реостат) и измерив силы токов и напряжения (I_1, U_1; I_2; U_2) при различном значении R.

В паспорте трансформатора указывается его номинальная мощность в вольт-амперах (В · А). Объясняют это тем, что отдаваемая

трансформатором мощность зависит от $\cos \varphi$ в цепи потребителей. Даже при небольшой мощности P_2 сила тока I_2 может стать такой большой, что обмотка может перегреться. Поэтому важно знать не только потребляемую мощность P_2, но и силу тока I_2. Например, мощность школьного регулятора напряжения (РНШ) 2 кВ · А. Пределы регулирования напряжения 0—220 В; 220—250 В. Соответственно допустимые для этих пределов значения силы тока 9 и 8 А.

КПД современных мощных трансформаторов весьма высок (≈98%). Поэтому при активной нагрузке приближенно можно принять, что $P_1 \approx P_2$, тогда $U_1 I_1 \cos \varphi_1 \approx U_2 I_2 \cos \varphi_2$; $\cos \varphi_1 \approx \cos \varphi_2 \approx 1$ и $U_1 I_1 \approx U_2 I_2$.

Отсюда следует, что $\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}$, т. е., увеличивая с помощью трансформатора напряжение, мы во столько же раз уменьшаем силу тока, и наоборот.

Для демонстрации применения трансформаторов при передаче электроэнергии на большие расстояния можно поставить такой опыт.

На штативах (рис. 14.9) натягивают два проводника 1[1], изображающие линию дальней электропередачи. Сопротивление проводников подбирают таким, чтобы подключенная к ним лампа на 12 В едва светила, когда на другой конец линии подается напряжение 12 В от РНШ, условно принимаемого за генератор электростанции. После этого на вход «линии электропередачи» включают повышающий трансформатор *2*, а на выход — понижающий трансформатор *3*. Клеммы на 12 В первого трансформатора присоединяют к РНШ. К выходу второго трансформатора подключают лампу на 12 В и наблюдают, что она ярко светится. Удивляет

[1] Удобны спирали от электроплитки.

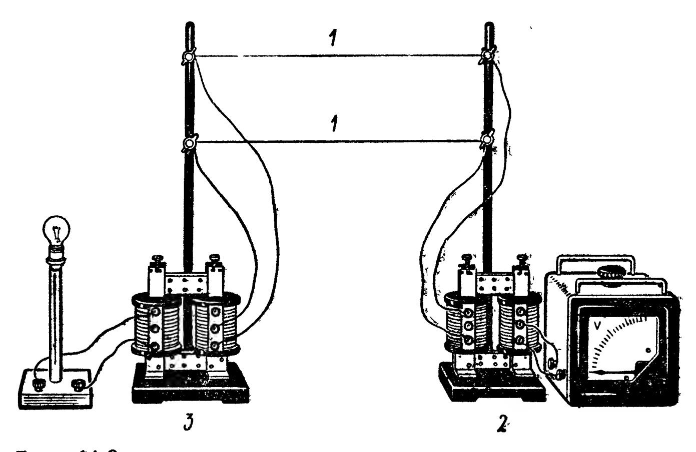


Рис. 14.9

учащихся в этом опыте то, что, несмотря на прежнее (12 В) напряжение генератора и включение последовательно с «линией электропередачи» катушек трансформаторов, представляющих дополнительное сопротивление, накал лампы не только не уменьшается, но резко возрастает.

Для закрепления и углубления изученного материала полезно решить следующую задачу:

Один ученик сказал, что потери энергии на нагревание проводов тем меньше, чем выше напряжение и меньше сила тока, так как $W = I^2Rt$. Второй же возразил ему: $W = \frac{U^2}{R}t$ и поэтому при высоком напряжении потери энергии в проводах больше. Объясните, кто из них прав.

Ответ. Прав первый ученик. Второй ученик путает падение напряжения на вторичной обмотке трансформатора U_2 с падением напряжения $U_п$ на подводящих проводах. Известно, что $U_2 = U_п + U_н$, где $U_н$ — падение напряжения на потребителях. По закону Джоуля — Ленца $W = I^2Rt$, где R — сопротивление линии передач. Допустим, что трансформатор отдает нагрузке мощность $P_2 = I_2U_2 \cos \varphi$. Тогда $I_2 = \frac{P_2}{U_2 \cos \varphi}$ и $W = \frac{P^2Rt}{U_2^2 \cos^2\varphi}$.
Следовательно, при заданной мощности потери энергии в подводящих проводах обратно пропорциональны квадрату напряжения U_2 (и квадрату $\cos \varphi$).

В связи с решением этой задачи полезно сообщить учащимся, что потери энергии и напряжения в линиях дальних электропередач достигают 10%. Допустимыми потерями напряжения в осветительных сетях являются 1 — 2%, а в силовых линиях производственных установок (электропечей, электродвигателей и т. д.) — 2—5%. Следует иметь в виду, что, помимо нагревания проводов, имеются и другие причины потери энергии в линиях электропередач, и прежде всего «утечка» энергии за счет коронных разрядов, которая может при высоких напряжениях даже превышать потери энергии на нагревание.

ГЛАВА 15

МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ. ЗВУК

Изучение данной темы является логическим продолжением предыдущих и началом ознакомления учащихся с новой для них важной областью физических явлений. Изучение механических волн, важное само по себе, преследует также задачу формирования у учащихся основных понятий о волновых явлениях вообще.

Специфическими для механических волн являются их природа и механизм образования в том или ином веществе. И совершенно общими и обязательными для волн любой природы являются та-

кие чисто волновые явления, как отражение, преломление, интерференция, дифракция и др. На эти специфически волновые явления, а также на общие величины и законы, их характеризующие, и должно быть обращено особое внимание. Эти понятия и законы должны «работать» на протяжении всего волнового концентра, обогащаясь новым конкретным содержанием.

Примерное поурочное планирование темы может быть следующим[1]:

1-й урок. Волновые явления. Распространение механических волн.
2-й урок. Длина волны. Скорость распространения волны. Волны в среде.
3-й урок. Звуковые волны. Скорость, громкость и высота звука.
4-й урок. Музыкальные звуки. Звуковой резонанс. Ультразвук.
5-й урок. Интерференция волн.
6-й урок. Принцип Гюйгенса. Отражение волн.
7-й урок. Стоячие волны.
8-й урок. Дифракция волн. Решение задач.
9-й урок. Повторение и обобщение материала.

1. ВОЛНОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ. БЕГУЩИЕ ВОЛНЫ

На конкретных примерах, используя имеющиеся у учащихся из жизненного опыта представления, показывают, что механические и электромагнитные колебания могут распространяться в различных средах. Для механических колебаний это объясняется силовыми связями между отдельными частицами сред. Наглядную картину распространения таких колебаний дает волна на поверхности воды.

В классе данное явление полезно пронаблюдать, используя волновую ванну (рис. 15.1).

После этого с помощью моделей дают понятие о поперечных и продольных волнах. Для объяснения механизма образования поперечной и продольной волн желательно прежде всего использовать волновую машину (рис. 15.2).

[1] 1 ч учебного времени взят из темы «Электромагнитные волны».

Рис. 15.1

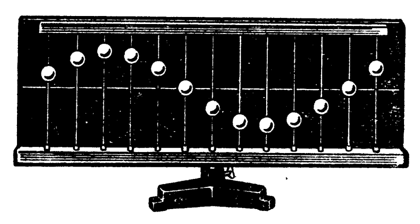
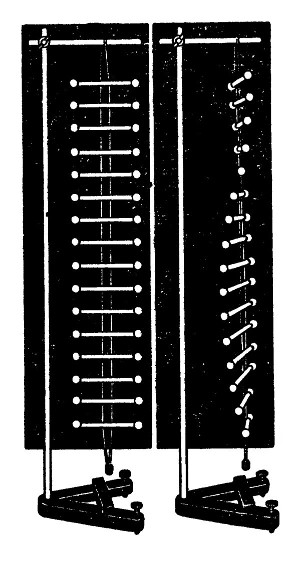
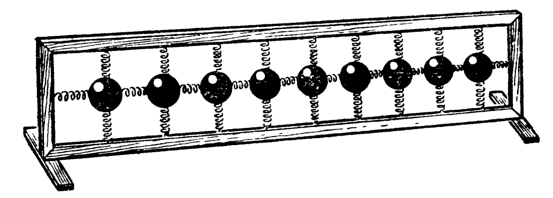


Рис. 15.2


Рис. 15.3


Рис. 15.4

Для демонстрации распространения поперечной волны желательно изготовить прибор (рис. 15.3), представляющий собой веревочную «лестницу», состоящую из двух параллельно натянутых шнуров, продетых сквозь концы деревянных перекладин. Необходимо также иметь 2—3 набора шариков или цилиндров, которые можно надеть на концы перекладин для изменения их массы и лучшей видимости колебаний. Обратив перекладины шариками к классу, отклоняют один из них в сторону и затем предоставляют самому себе. В результате все шарики поочередно, начиная с ближайшего, приходят в колебательное движение, импульс которого тем медленнее распространяется от места возбуждения колебаний, чем больше масса шариков.

Понятие о продольной волне можно ввести с помощью прибора, показанного на рисунке 15.4. Отклонение любого шарика от положения равновесия вдоль цепочки порождает импульс, при прохождении которого шарики смещаются вдоль направления его распространения.

Прибор с равным успехом можно использовать и для демонстрации распространения поперечной волны. Возможны и другие демонстрации [12, рис. 68 и 69; 21, рис. 70; 51, с. 50]. Механизмы образования поперечной и продольной волн поясняют также с помощью рисунков [12, рис. 70—71].

2. ДЛИНА ВОЛНЫ. СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН. ВОЛНЫ В СРЕДЕ

Опираясь на демонстрации (см. рис. 15.2,3,4), вводят следующие величины, характеризующие волну;

λ — длина волны (расстояние между двумя ближайшими точками, имеющими разность фаз, равную 2π);

T — период колебания частицы.

Поскольку за время T волна распространяется на расстояние, равное длине волны λ, то $\lambda = vT$. Поэтому можно также сказать,

что длина волны — это расстояние, на которое распространяется волна за время, равное периоду колебания частицы.

В сознании учащихся нужно четко разграничить два понятия: скорость гармонического колебания точки u и скорость распространения волны v.

Скорость гармонического колебательного движения частицы $u = x_{max}\omega \cos(\omega t + \varphi)$. Это мгновенная скорость колебания точки для времени t. Скорость же v для данной среды — величина постоянная. Ее называют также фазовой скоростью, поскольку она характеризует скорость распространения какой-либо фазы волны в пространстве[1]. В учебнике это понятие хорошо поясняется примером с чайкой, летящей над гребнем волны.

Следует также особо подчеркнуть, что при распространении волны не происходит переноса вещества: колеблющиеся частицы не изменяют положения своего равновесия. Однако энергия при волновом движении передается. Впервые представление о распространении энергии волной было введено известным русским физиком Н. А. Умовым [68, задача 19].

При изучении и описании волн в сплошных средах, например в воде или воздухе, используют те же закономерности и понятия, которые установлены для «одномерных» волн, распространяющихся, например, в стержнях или струнах. Вместе с тем здесь имеют место некоторые специфические закономерности, требующие введения новых понятий. К таким понятиям относятся волновая поверхность, луч, плотность энергии и интенсивность волны.

При изучении волн в среде используют опыты с волновой ванной.

Чередующиеся светлые и темные полосы на экране, создающие образ бегущей волны, получаются благодаря тому, что пучности (впадины) на поверхности воды действуют подобно цилиндрическим линзам, собирая (рассеивая) падающий на них свет.

Укрепив на вибраторе (см. рис. 15.1) пластинку, сначала получают «плоскую волну».

Все частицы, находящиеся в одной плоскости, параллельной пластинке вибратора, например на гребне или впадине волны, колеблются в одной фазе. Поэтому такие поверхности и называются поверхностями равной фазы или волновыми поверхностями. Каждая такая поверхность перемещается в пространстве с фазовой скоростью, которую и называют скоростью распространения волны в данной среде.

В каждый момент времени скорость распространения волны направлена по нормали к волновой поверхности. Используя этот

---

[1] Уравнение бегущей волны $x = x_{max} \cos \omega \left(t - \frac{l}{v}\right)$, где l — расстояние от места возбуждения колебаний до рассматриваемой частицы. Следовательно, смещение колеблющихся точек в волне является функцией двух переменных — времени t и расстояния l до источника колебаний.

факт, вводят понятие луча как линии, нормальной к волновой поверхности.

С помощью волновой ванны поясняют также образование сферических волн. В идеальном случае шаровую волну дает пульсирующая сфера. Практически же на достаточном расстоянии от любого «точечного» источника (свистка, колокола и т. п.) в однородной среде волны можно считать сферическими.

Изменение механической энергии волны в общем случае происходит из-за ее рассеяния в пространстве и превращения во внутреннюю энергию среды.

3. ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ. СКОРОСТЬ, ГРОМКОСТЬ И ВЫСОТА ЗВУКА

Ту часть упругих волн, которая воспринимается человеческим ухом (16—20 000 Гц), обычно называют звуком. Благодаря наличию органа слуха человек получает из окружающей среды с помощью звуков большую и разнообразную информацию. Посредством звуков осуществляется также человеческая речь. Поэтому учение о звуке представляет собой особую часть учения о колебаниях и волнах, называемую акустикой. Из специфических вопросов акустики в средней школе изучают источники звука, распространение звука в различных средах, физические и физиологические характеристики звука. Желательно также познакомить учащихся с некоторыми сведениями из истории акустики [51, с. 55].

Понятие о том, что источниками звука служат колеблющиеся тела, дают с помощью демонстрации звучащих пластин, камертонов, струн и т. п. А роль упругой промежуточной среды, в первую очередь воздуха, показывают с помощью известного опыта с электрическим звонком, помещенным под колокол воздушного насоса [12, рис. 78].

Скорость звука. Используя демонстрации (см. рис. 15. 3, 4), поясняют: чем значительнее силы взаимодействия между частицами среды и меньше их масса, тем больше скорость упругих колебаний. Учителю следует также иметь в виду и сообщить учащимся, что в твердых телах скорость распространения поперечного и продольного импульсов различна и что $c_{\parallel} > c_{\perp}$[1].

В обычных условиях между слоями жидкостей и газов при их сдвиге не возникает сил упругости. Поэтому поперечные импульсы в жидкостях и газах возникать и распространяться не могут.

Полезно обратить внимание на то, что скорость звука в газе близка по модулю к скорости теплового движения молекул.

---

[1] $c_{\parallel} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$; $c_{\perp} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$, где E — модуль Юнга, а G — модуль сдвига. $E > G$, поэтому скорость распространения продольного импульса больше скорости распространения поперечного импульса в $\sqrt{\frac{E}{G}}$ раз.

Способ определения скорости звука в воде поясняют на основе описания известного опыта, выполненного на Женевском озере в 1827 г. Колладоном и Ж. Штурмом [12]. Следует обратить внимание на несколько неожиданный для учащихся результат: скорость звука в воде (1435 м/с при 8° С) примерно втрое больше, чем в воздухе.

С одним из возможных способов определения скорости звука в твердых телах (металлах) можно познакомить учащихся на примере следующей задачи:

Скорость звука в чугуне впервые была определена французским ученым Био следующим образом. У одного конца чугунной трубы ударяли в колокол, у другого конца наблюдатель слышал два звука: сначала один, пришедший по чугуну, а спустя некоторое время — второй, пришедший по воздуху. Длина трубы была 930 м, промежуток времени между распространением звуков оказался равным 2,5 с. Найти по этим данным скорость звука в чугуне. Скорость звука в воздухе принять равной 340 м/с.

Ответ. $c = 3950$ м/с. Скорость звука в твердых телах значительно больше, чем в жидкостях и газах. Причина этого — их большая упругость.

Во всех рассмотренных выше случаях распространения звука мы совершенно не интересовались его частотой. Это объясняется тем, что в обычных условиях скорость звука не зависит от частоты. Понять это поможет решение следующих задач.

1. Кривая, изображенная на рисунке 15.5, показывает, как изменяется длина звуковой волны в железе от частоты колебаний (при $t = 20$ °С). Определить по графику скорость распространения звука в железе. Зависит ли скорость звука от длины волны?

Решение задачи покажет, что скорость звука $c = \lambda \nu = 5000$ м/с не зависит от длины волны.

2. Через воду, землю и даже сталь можно слышать без изменения тональности звуки, которые раздаются в воздухе. Как это объяснить, ведь частота $\nu = \frac{c}{\lambda}$, а скорость звука в воде и тем более в стали в несколько раз больше, чем в воздухе?

Ответ. Скорость распространения колебаний возрастает во столько же раз, во сколько увеличивается длина волны. Поэтому частота колебаний не изменяется.

Громкость звука. При изучении данного вопроса нужно иметь в виду следующие сведения о звуке как физическом и

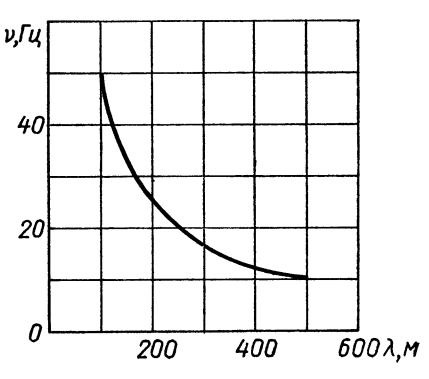
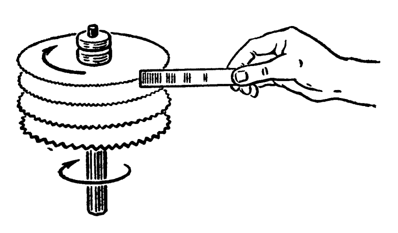


Рис. 15.5


Рис. 15.6

физиологическом явлении. Физическими характеристиками звука являются интенсивность (сила) звука, частота колебательных процессов и состав звука, а зависящими от них физиологическими характеристиками — соответственно громкость, высота и тембр звука.

Силу звука I определяют количеством энергии, переносимой в единицу времени через единицу площади фронта волны.

Порог слышимости, т. е. наименьшая интенсивность или сила звука, которая едва улавливается ухом при 1000 Гц, составляет примерно 10^{-12} Дж/(м^2 · с). При силе звука, равной 10^6 — 10^7Дж/(м^2 · с), возникают болевые ощущения.

Энергия, переносимая звуковой волной, обычно сравнительно невелика. Так, например, при громкой речи оратора в течение 1 ч создаются звуковые волны, энергией которых можно было бы нагреть стакан воды всего на 0,05 °С [68, с. 92]. Нетрудно показать, что громкость звука увеличивается с амплитудой колебаний.

Высота звука. Зависимость высоты звука от частоты колебаний наглядно демонстрируют, изменяя длину зажатого в тисках ножовочного полотна [12, рис. 76] и с помощью записи на закопченной пластинке колебаний различных камертонов (см. рис. 12.5), а также с помощью зубчатой (рис. 15.6) и дисковой сирен [57, ч. 2, опыт 39].

Желательно также продемонстрировать учащимся звуки от 16 до 20 000 Гц, используя звуковой генератор.

4. МУЗЫКАЛЬНЫЕ ЗВУКИ. ЗВУКОВОЙ РЕЗОНАНС. УЛЬТРАЗВУК

Музыкальные звуки. Восприятие звуков играет огромную роль в жизни человека. Их значение не ограничивается только той информацией, которую они дают непосредственно об окружающем мире через слово. Ощущения звука имеют эмоциональный тон, влияющий на настроение и, следовательно, жизнедеятельность человека. Для учителя сообщаем следующие сведения, которые в той или иной мере могут быть использованы в его работе. Одни звуки считают «неприятными», а другие — «приятными», или «музыкальными». Для музыкальных звуков характерна вполне определенная периодичность колебаний. Звуки, лишенные такой периодичности, воспринимаются как шумы. Эмоциональное воздействие звуков зависит также от их сочетания. При одновременном восприятии двух звуков они кажутся благозвучными, когда их частоты выражаются отношением малых целых чисел: 2 : 1, 3 : 2, 5 : 4 и т. д. Чем проще это отношение, тем благозвучнее сочетание.

Три звука образуют благозвучное «мажорное трезвучие» в том случае, если их частоты относятся, как 4 : 5 : 6.

Басовая низкая нота человеческого голоса соответствует частоте 80 Гц, а высокая нота (сопрано) — 1300 Гц.

Подключив микрофон к электронному осциллографу, следует показать учащимся форму кривых, которые получаются при длительном звуке гласных и согласных. Звуки гласных дают сравнительно простую кривую на экране осциллографа, а согласных — кривую очень сложной формы.

Акустический резонанс. При качественном рассмотрении этого вопроса опираются на имеющиеся у учащихся понятия о резонансе при механических колебаниях.

Звуковая волна вызывает колебания микроскопических частиц среды, которые, несмотря на малость их амплитуды, могут вызвать значительные колебания макротел.

Наглядно это демонстрируют при помощи камертонов (рис. 15.7). Возбуждая молоточком колебания левого камертона, наблюдают, как толстые стальные ножки правого камертона также приходят в колебательное движение, о чем можно судить по его звучанию (заглушив рукой первый камертон) и по отскакиванию упругого шарика на нити. Далее поясняют использование и проявление акустического резонанса в музыкальных инструментах, голосовом аппарате человека и т. д. [68].

Ультразвук. В процессе эволюции у человека выработалась способность воспринимать лишь жизненно важные звуки, ограждая нервную систему от незначительных по интенсивности звуков, не превышающих нижний абсолютный порог чувствительности, а также от звуков, частоты колебаний которых лежат за пределами интервала 16—2000 Гц (инфра- и ультразвуки). Надо, однако, иметь в виду, что не слышимые человеком инфра- и ультразвуки хорошо слышат и используют некоторые виды животных [68; 92].

Для получения ультразвуков чаще всего применяют пьезоэлектрический эффект и магнитострикцию [57, ч. 2, опыт 51].

Учащимся нужно рассказать о некоторых специфических свойствах ультразвуковых волн и их практическом применении [12, § 45; 51, § 27], в том числе дать понятие о гидролокации. Принцип акустической локации желательно также показать на опыте[1],

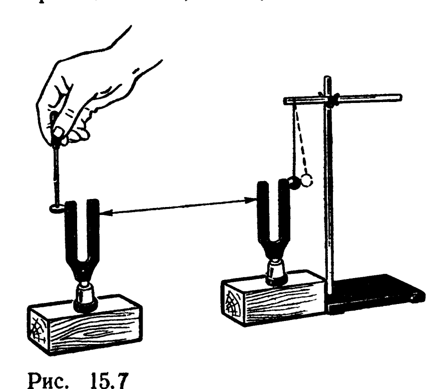


Рис. 15.7

[1] См.: Евсюков А. А., Крылов М. А. Демонстрация принципа акустической локации. —Физика в школе, 1971, № 3, с. 69.

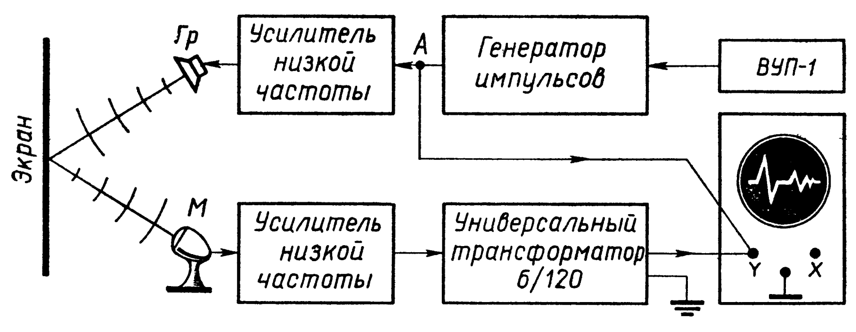


Рис. 15.8

схема которого приведена на рисунке 15.8. Кратковременные импульсы напряжения от релаксационного генератора на неоновой лампе попадают мгновенно на вертикальный вход осциллографа по проводу AY и с некоторым запозданием по пути A, $Гр$,$Э$,$М$,Y. Если проградуировать экран осциллографа, то по расстоянию между двумя всплесками можно определить расстояние от установки до предмета; от которого отражаются волны.

Ряд вопросов об ультразвуке можно рассмотреть путем решения задач [27, № 775—780]. В заключение нужно показать кинофильм «Ультразвук и его применение в технике».

5. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ВОЛН

«Интерференция волн — явление усиления или ослабления амплитуды результирующей волны в зависимости от соотношения между фазами складывающихся в пространстве двух (или нескольких) волн с одинаковыми периодами» [30, т. 2, с. 192].

На примере интерференции механических волн учащиеся должны получить и в дальнейшем использовать понятие о явлении, характерном для всяких волн независимо от их природы.

Конкретная же задача темы состоит в рассмотрении колебательных процессов, происходящих в упругой среде при распространении в ней одновременно нескольких волн.

Для получения устойчивой картины колебаний какой-либо точки среды необходимо, чтобы волны были когерентными, т. е. чтобы все время складывались колебания одной и той же частоты с постоянными амплитудами и неизменной разностью фаз.

Анализируя рисунки, приведенные в учебнике [12, рис. 86, 87, 88], вводят понятие о разности хода волн и об условии максимума и минимума амплитуд:

$$\Delta d_1 = 2k\frac{\lambda}{2} \text{ и } \Delta d_2 = (2k+1)\frac{\lambda}{2}.$$

Явление иллюстрируют с помощью волновой ванны, в которой создают две когерентные волны.

Общие пояснения причин образования интерференционной картины желательно дополнить более детальным рассмотрением наложения волн в отдельных точках поверхности воды, решив следующую задачу:

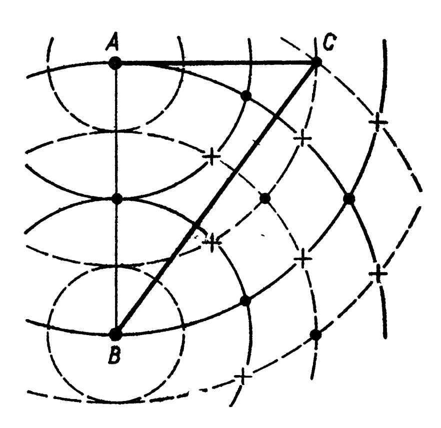


Рис. 15.9

С помощью упругой пластинки-вибратора на поверхности воды создают две волны. Найдите построением положение впадин и пучностей, образовавшихся при интерференции волн. Расстояние между когерентными источниками — 10 см, длина волны — 5 см. Определите амплитуды колебаний, которые получились при интерференции волн в точках, удаленных от источников колебаний (*A* и *B*) соответственно на расстояние: а) $l_1 = 50$ см и $l_2 = 40$ см; б) $l_1' = 50$ см и $l_2' = 32,5$ см; в) $l_1'' = 55$ см и $l_2'' = 61,25$ см. Амплитуды слагаемых колебаний в указанных точках считать одинаковыми.

Решение. Вокруг каждого «источника» колебаний (рис. 15.9) проводим концентрические окружности радиусом $R_1 = \frac{\lambda}{2}$; $R_2 = \lambda$ и т. д. Точки их пересечения, для которых разность хода волн равна четному числу полуволн, обозначим кружочками (пучности), а нечетному — крестиками (впадины). Используя данные задачи, получим:

$$\text{а) } \frac{l_1 - l_2}{\lambda} = 2; \quad \text{б) } \frac{l_1' - l_2'}{\lambda} = 1,5; \quad \text{в) } \frac{l_2'' - l_1''}{\lambda} = 1,25.$$

Амплитуды колебаний соответственно равны: $2A$; 0 и 1,4 A. (A — амплитуда слагаемых колебаний.) Для случая b значение амплитуды находят аналитически, приняв $\Delta\varphi = \frac{\pi}{2}$.

Интерференцию звуковых волн можно продемонстрировать с помощью камертона, ножки которого, колеблясь в противофазе, создают волны, которые в значительной мере гасят одна другую. Поворачивая камертон, поднесенный к уху, вокруг оси,

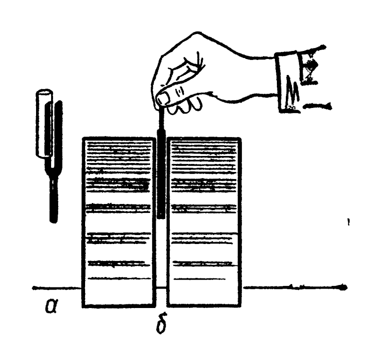


Рис. 15.10

проходящей через его ножку, можно обнаружить направления, по которым происходит усиление и ослабление колебаний.

Если на одну из ножек камертона надеть цилиндр (рис. 15. 10, *а*) или поместить камертон между двумя брусками (рис. 15. 10, *б*) и тем самым значительно ослабить одну из интерферирующих волн, то звучание значительно усилится.

6. ПРИНЦИП ГЮЙГЕНСА. ОТРАЖЕНИЕ ВОЛН

Выдающийся голландский ученый Х. Гюйгенс (1629—1695) сформулировал в 1690 г. свой знаменитый принцип: «Ппи испускании световых волн следует иметь в виду, что каждая частичка материи, в которой распространяется волна, не должна сообщать свое движение только ближайшей частичке, находящейся на одной прямой с первой частичкой и источником света; она также необходимо сообщает его всем частичкам, которые соприкасаются с ней и препятствуют ее движению. Таким образом, необходимо, чтобы вокруг каждой частички зарождалась волна, центр которой был бы в этой частичке»[1].

В своих исследованиях Гюйгенс постоянно использует аналогию света и звука, и приведенная им формулировка принципа распространения света представляется самоочевидной для звуковых волн в упругой среде, применительно к которым и сообщают учащимся сущность принципа Гюйгенса: «каждая точка среды, до которой дошло возмущение, сама становится источником вторичных волн» [12, с. 96].

Для пояснения данного принципа целесообразно продемонстрировать образование элементарной волны у отверстия в преграде, поставленной в волновой ванне на пути распространения волны [12, рис. 93].

Плодотворность принципа Гюйгенса видна на примере вытекающих из него следствий. С его помощью легко объясняется, например, закон отражения волн [12, § 47].

Закон отражения волн наглядно можно проиллюстрировать с помощью известных опытов в волновой ванне [57, ч. 2, опыт 35], а также с помощью звуковых волн, возбуждаемых звуковым генератором (рис. 15.11) [57, ч. 2, опыт 47]. Простые, но интересные опыты по отражению звука (рис. 15.12) учащиеся могут самостоятель-

[1] Цитируется по кн.: Веселовский И. Н. Христиан Гюйгенс. М., 1959, с. 100—101.

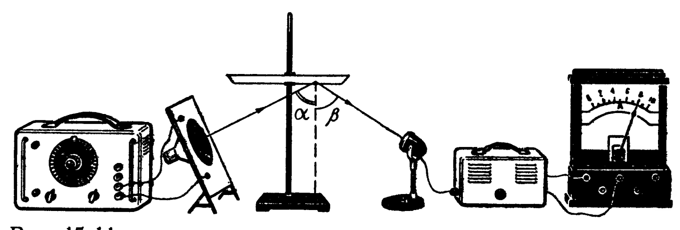


Рис. 15.11

но проделать дома [70]. Эффектны также опыты по отражению звуковых волн вогнутыми зеркалами, в фокусе которых помещен источник звука («звуковой прожектор»).

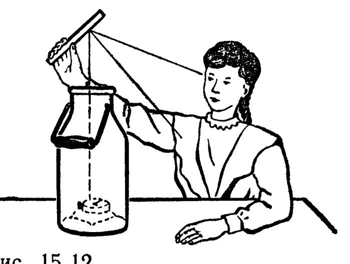


Рис. 15.12

7. СТОЯЧИЕ ВОЛНЫ

Стоячие волны возникают при сложении двух когерентных колебаний, вызванных падающей и отраженной волной. Образование стоячих волн демонстрируют, приводя шнур в колебание с помощью электродвигателя с эксцентриком или просто рукой (рис. 15.13).

Для пояснения свойств стоячей волны и ее отличий от волны бегущей полезно использовать следующую модель (рис. 15. 14).

Тонкую и длинную трубку *1* изгибают по синусоиде и продевают сквозь нее шнур *2*. Натянув шнур, двигают по нему трубку, например, слева направо, имитируя распространение бегущей волны с некоторой скоростью $\vec{v}$. Затем ту же трубку вращают вокруг оси OO' и наблюдают синфазное изменение амплитуд соответствующих точек стоячей волны.

Обе демонстрации особенно выразительны в теневой проекции. С помощью опытов и поясняющих их чертежей устанавливают, что расстояние между соседними узлами и пучностями равно $\lambda/2$, что все точки между соседними узлами колеблются в одной фазе, что переноса энергии в стоячей волне, в отличие от бегущей, нет.

Заметим также, что для образования стоячих волн необходимо, чтобы обе волны (и падающая и отраженная) были одинаковы по интенсивности. А это значит, что потери энергии при отражении волны от препятствия должны быть пренебрежимо малыми. Такой преградой в идеальном случае может быть абсолютно неподвижная стена или вакуум.

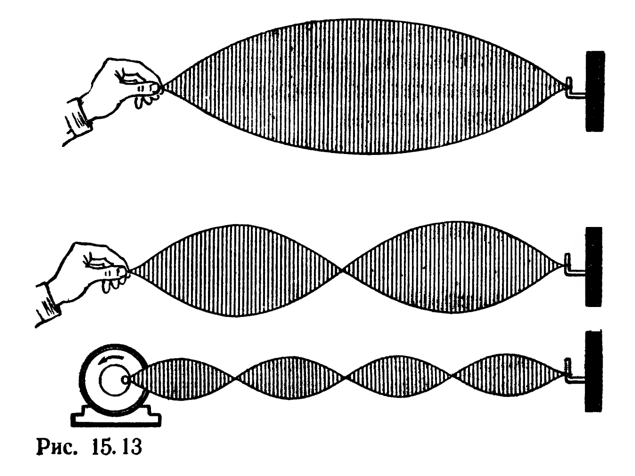


Рис. 15.13

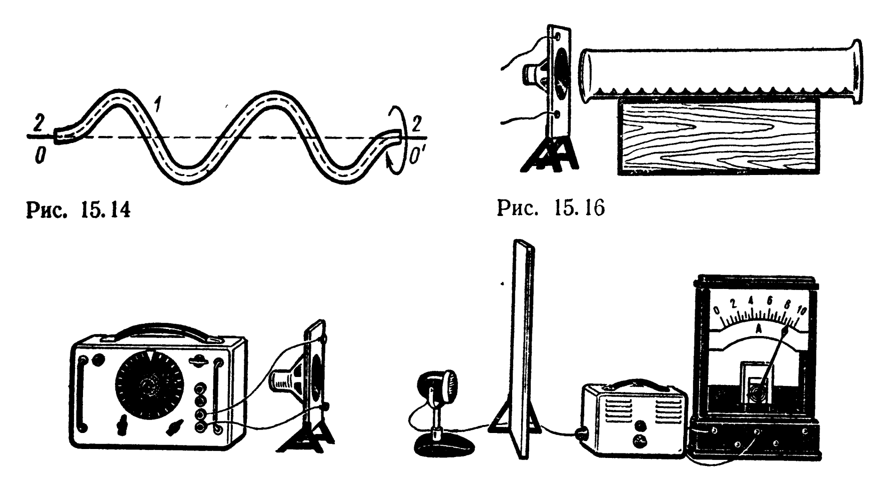


Рис. 15.14

Рис. 15.16

Рис. 15.15

Наконец, необходимо, чтобы направление распространения волн было нормально к той поверхности, от которой они отражаются. Заметим также, что колебания частиц у преграды в падающей и отраженной волнах находятся в противофазе. Обычно говорят, что при отражении происходит «потеря» полуволны или поворот фазы на π.

Стоячие звуковые волны в воздухе можно наглядно продемонстрировать, используя установку, показанную на рисунке 15.15. С помощью звукового генератора с громкоговорителем возбуждают звуковые волны небольшой интенсивности на частоте 1000—3000 Гц. Стоячие волны образуются при отражении этих волн от экрана. Узлы и пучности обнаруживают с помощью микрофона, соединенного с усилителем, на выход которого присоединен демонстрационный гальванометр [57, ч. 2, опыт 48].

Еще большее впечатление остается у учащихся при наблюдении стоячих волн по методу пыльных фигур Кундта (рис. 15.16).

Для опыта в горизонтально расположенную стеклянную трубку, закрытую с одного конца, насыпают мелкую пробковую крошку и у отверстия располагают громкоговоритель, соединенный с генератором звуковой частоты.

При определенной частоте колебаний пучности наглядно обозначаются сначала характерными вихрями, а затем четкими скоплениями пробковой пыли. Эти опыты могут быть использованы для измерения длин звуковых волн.

8. ДИФРАКЦИЯ ВОЛН

Дифракцией волн называют огибание волнами различных препятствий и, следовательно, отклонение их от прямолинейного распространения.

Изучение материала можно начать с проблемного опыта, показав дифракцию волн на щелях различной ширины в волновой ванне [12, рис. 97, 98]. Дальнейшая задача заключается в том, чтобы объяснить, почему в случае малого отверстия волны свободно заходят за экран, а в случае широкого отверстия мы их почти не обнаруживаем в области геометрической тени. Для объяснения целесообразно еще раз обратиться к задаче (см. рис. 15.9). Расстояние между источниками колебаний в данном случае равно 2λ. В пространстве наблюдается четко выраженная интерференционная картина усиления в одних и ослабления в других местах колебаний частиц среды.

Уменьшим теперь расстояние d таким образом, чтобы оно было значительно меньше λ. Тогда в пространстве не найдется ни одной точки, где бы колебания происходили в противофазе. Колебания всюду будут усиливать друг друга, и поэтому оба источника на некотором расстоянии от них можно считать как один точечный источник. Это имеет место и на самом деле, когда, например, ширина щели в экране мала по сравнению с длиной волны. Такую щель по принципу Гюйгенса можно принимать за источник элементарных сферических волн.

Аналогичным образом объясняется и дифракция волн при малом экране, поперечник которого равен d. При $d < \lambda$ волны, распространяющиеся от краев, на некотором расстоянии полностью заходят за экран и, интерферируя, дают такую картину, как будто экрана нет совсем.

При увеличении размеров экрана или щели фронт, например, плоской волны уже будет образовываться большим числом источников колебаний. Основная часть волны пройдет щель, не претерпев никаких изменений. Особые условия возникнут только по краям щели, где источники колебаний создадут элементарные сферические волны, которые зайдут в область геометрической тени. Но при этом надо иметь в виду, что с увеличением размера щели интенсивность прошедших волн ввиду увеличения числа источников колебаний растет и явление дифракции оказывается относительно менее заметно (на волны, заходящие в область тени, приходится все меньшая доля энергии). Попасть в середину тени эти волны могут только на значительном расстоянии от экрана, где их энергия с расстоянием может уменьшиться настолько, что дифракционная картина и по этой причине станет невыразительной.

Дифракцию звуковых волн на опыте можно наблюдать с помощью установки, показанной на рисунке 15.17 [57, ч. 2, опыт 49]. Перемещая микрофон вокруг щели, обнаруживают загибание волн за ее края. Показывают также дифракцию волн от небольшого экрана, например от книги.

В качестве упражнения на этом уроке полезно решить задачу о дифракции волн от двух щелей. При ее решении используется уже известный учащимся случай интерференции волн от двух когерентных источников (рис. 15.9) и опыт с интерференцией волн от двух

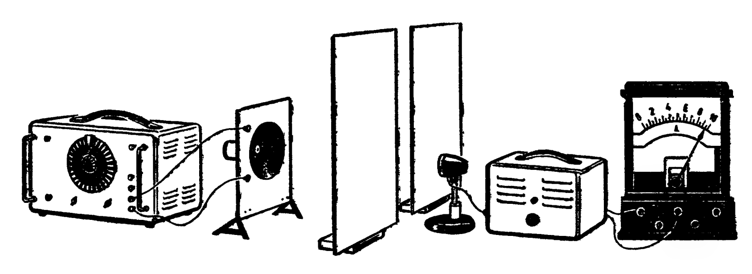


Рис. 15.17

щелей в волновой ванне [57, ч. 2, опыт 38]. Решение этой задачи в дальнейшем поможет уяснению понятия о дифракции света.

На заключительном уроке по теме «Механические волны, звук» следует обобщить полученные учащимися сведения, обратив особое внимание на следующие вопросы:

1) Виды волн. 2) Величины, характеризующие механическую волну, и связь между ними. 3) Связь между физическими и физиологическими характеристиками звука. 4) Интерференция и дифракция как характерные волновые явления.

В заключение нужно рассмотреть проявление изученных законов в окружающей жизни, на производстве и в природе. Желательно также в ознакомительном плане кратко рассказать учащимся о записи и воспроизведении звука [68, с. 114].

ГЛАВА 16

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

Изучение данной темы, имеющей важное научное, мировоззренческое и политехническое значение, основано прежде всего на понятиях об электромагнитном поле (гл. 8 и 10), понимании учащимися закона электромагнитной индукции (гл. 11), явлений в колебательном контуре (гл. 13) и идей Максвелла о токах смещения.

Эти понятия и сведения следует повторить с учащимися, обратив особое внимание на знание закона Фарадея: $\mathscr{E}_i = -\Phi'$.

Здесь особенно важно подчеркнуть, что изменение магнитного поля создает вихревое электрическое поле, и выработать у учащихся твердые навыки определения направления напряженности электрического поля на основе правила Ленца.

Тему следует в полной мере использовать также для воспитания у учащихся диалектико-материалистического мировоззрения, патриотизма и интернационализма. Благодатный материал для этого дают сведения об электромагнитном поле, о материалистических идеях Фарадея и Максвелла, научном и патриотическом подвиге А. С. Попова, успехах советской радиотехники. В том числе учащиеся должны получить понятия о космической радиосвязи и телевидении.

Материал темы по урокам примерно может быть распределен следующим образом[1]:

1-й и 2-й уроки. Электромагнитное поле и его характеристики. Повторение закона Фарадея и правила Ленца. Связь между переменными электрическим и магнитным полями. Упражнения.

3-й урок. Повторение материала об электромагнитных колебаниях в контуре. Передача электромагнитных взаимодействий. Электромагнитная волна.

4-й урок. Открытый колебательный контур. Опыты Герца. Скорость распространения электромагнитных волн.

5-й урок. Изобретение радио А. С. Поповым. Жизнь и деятельность А. С. Попова.

6й урок. Повторение сведений о ламповом генераторе. Принципы современной радиосвязи. Амплитудная модуляция.

7-й урок. Детектирование. Детекторный приемник.

8-й урок. Радиоприемник с усилителем низкой частоты.

9-й и 10-й уроки. Повторение основных свойств волн (на примере механических волн, звука). Наблюдение свойств электромагнитных волн.

11-й урок. Радиолокация.

12-й урок. Понятие о космической радиосвязи.

13-й урок. Развитие средств связи в СССР.

14-й урок. Повторение и обобщение материала.

1. ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ПЕРЕМЕННЫМИ МАГНИТНЫМ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЯМИ. ТОКИ СМЕЩЕНИЯ

Вначале путем беседы необходимо восстановить в памяти учащихся и систематизировать следующие основные сведения о взаимосвязи магнитных и электрических явлений[2]:

1. Движущиеся электрические заряды (ток) «порождают» магнитное поле (опыт Эрстеда).

2. Изменяющееся магнитное поле порождает электрическое поле (закон электромагнитной индукции Фарадея: $\mathscr{E}_i = -\Phi'$).

3. В колебательном контуре происходит взаимное превращение энергии электрического и магнитного полей $\left(\frac{CU^2}{2} = \frac{LI^2}{2}\right)$.

4. В проводнике, движущемся в магнитном поле перпендикулярно его линиям индукции, возникает ЭДС индукции $\mathscr{E}_i = |\vec{B}| \cdot |\vec{v}|\, l$. На заряд q в системе, движущейся с частицей, действует только сила $\vec{F_э} = q\vec{E}$, а в системе, в которой вычисляю-

[1] 1 ч учебного времени нами передан в тему «Механические колебания и волны».

[2] Соответствующий материал по учебному пособию «Физика-9» ученики должны были повторить дома.

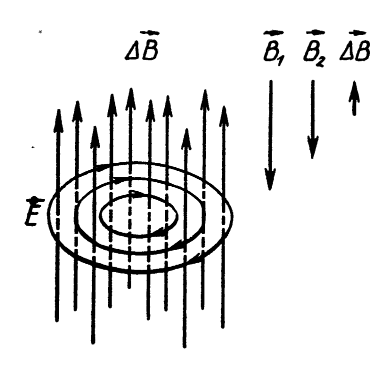


Рис. 16.1

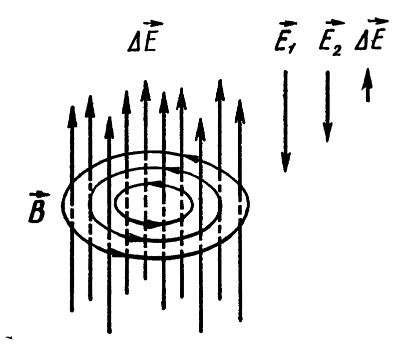


Рис. 16.2

тся величины $\vec{v}$ и $\vec{B}$, действует также сила $|\vec{F}_м| = q|\vec{v}| \cdot |\vec{B}| \sin \alpha$.

5. Изменяющееся магнитное поле порождает вихревое электрическое поле, напряженность которого связана с изменением вектора $\vec{B}$ по правилу левого винта (рис. 16.1). Для закрепления этого правила в классе и дома учащимся полезно решить задачи, подобные рассмотренным в главе 11 (см. рис. 11.2, 11.3).

После этого переходят к формированию важнейшего и нового для учащихся понятия о возникновении вихревого магнитного поля при изменении поля электрического (рис. 16.2).

Возникновение вихревого электрического поля при изменении магнитного поля было доказано опытами Фарадея по электромагнитной индукции. Логично предположить, как это и сделал Дж. Максвелл, что существует и противоположный процесс — возникновение вихревого магнитного поля при изменении поля электрического. Такое поле, в частности, существует между пластинами конденсатора колебательного контура.

По гипотезе Максвелла изменяющееся электрическое поле между пластинами конденсатора создает такое же переменное магнитное поле, как и ток в подводящих проводах. Развивая далее эту мысль, нужно использовать известные учащимся сведения о том, что конденсатор не создает разрыва в цепи переменного тока (см. рис. 13.5). Поэтому, рассматривая колебательный контур как замкнутую цепь, можно принять, что через конденсатор протекает такой же ток, как и в подводящих проводах. Этот гипотетический «ток» называется «током смещения» в отличие от «тока проводимости». Ток проводимости и ток смещения имеют важное общее свойство — они создают магнитные поля.

Поскольку магнитная индукция поля, созданного током смещения, направлена так же, как магнитная индукция поля, созданного током проводимости, то вектор индукции и вихревого магнитного поля $\vec{B}$, возникающего при изменении электрического поля, образует с вектором $\Delta\vec{E}$ правовинтовую систему (см. рис. 16.2).

2. ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ВОЛНА

Вначале, используя имеющиеся у учащихся представления об электрических и магнитных полях, полезно в самом общем виде обсудить вопрос их распространения на основе теории близкодействия. Затем кратко повторить основные сведения о процессах в колебательном контуре, особенно о взаимных превращениях энергии переменных электрического и магнитного полей, их взаимосвязи и взаимообусловленности.

Продолжим рассмотрение данных взаимосвязей на примере колебательного контура (рис. 16.3). Допустим, что в некоторый момент мы замыкаем ключ *К*. Тогда на участке *АОС* возникает переменный ток, обусловленный колебательным движением электронов. Рассмотрим четверть периода, т. е. время, в течение которого ток и вместе с ним индукция вихревого магнитного поля возрастают от нуля до некоторого максимального значения. Направление линий магнитной индукции $\vec{B}$ этого поля определяется по правилу буравчика.

Рассмотрим далее какую-либо область пространства, например левее точки *О*, которая пронизывается линиями магнитной индукции $\vec{B}$ переменного магнитного поля, направленными в данном случае за плоскость чертежа. По правилу Ленца или по правилу левого винта определим, что линии напряженности $\vec{E}'$ электрического поля будут направлены против движения часовой стрелки.

Изменение этого электрического поля создаст магнитное поле, индукцию которого обозначим $\vec{B}'$. Это поле, изменяясь, в свою очередь, создаст электрическое поле и т. д.

При перезарядке конденсатора в следующую четверть периода электроны будут продолжать двигаться с ускорением (замедлением). В пространстве около проводника вихревое магнитное поле начнет уменьшаться, изменение $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$ будет иметь противоположный знак, изменится на противоположное и направление напряженности вихревого электрического поля.

Но в целом процесс будет аналогичен описанному для первой четверти колебаний. При непрерывном колебании электронов в контуре в пространстве будет распространяться электромагнитная волна.

Процесс распространения электромагнитного импульса полезно пояснить «цепочкой» Брэгга, состоящей из железных и медных или алюминиевых колец.

Со школьным оборудованием опыт можно поставить следующим образом. Берут два-три

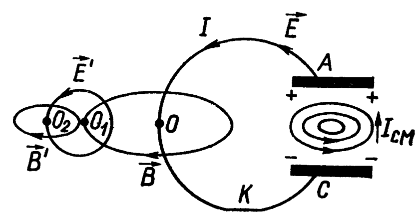


Рис. 16.3

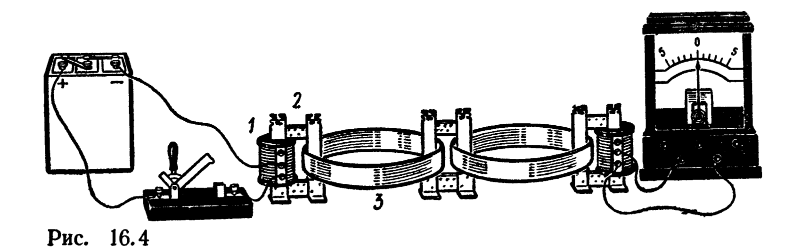


Рис. 16.4

универсальных школьных трансформатора, снимают их низковольтные катушки и вместо них на сердечники надевают толстые медные или алюминиевые кольца, как показано на рисунке 16.4.

Обмотку одного трансформатора подключают к источнику постоянного тока, а обмотку второго — к гальванометру. При замыкании и размыкании тока вокруг витков катушки трансформатора *1* возникает вихревое магнитное поле. Оно будет особенно сильным в железном сердечнике *2*. При пронизывании этим полем алюминиевого кольца *3* в последнем возникает индукционный ток. Эти рассуждения справедливы и для следующего кольца.

Существование вещества (в данном случае металлических колец) на пути распространения электромагнитного поля не обязательно. Для пояснения этой мысли убирают все кольца и сердечники, находящиеся между крайними катушками трансформатора, и располагают последние на таком расстоянии одну от другой, чтобы при включении тока в обмотке *1* гальванометр обнаруживал индукционный ток. Следовательно, электромагнитный импульс передается и через воздух. Нетрудно далее пояснить, что импульс передается и через вакуум, что учащимся хорошо известно на примере осуществления радиосвязи с космическими кораблями.

Из рисунка 16.3 и опыта с цепочкой Брэгга следует, что векторы $\vec{E}$ и $\vec{B}$ в электромагнитной волне лежат во взаимно перпендикулярных плоскостях и вместе с тем перпендикулярны направлению распространения электромагнитной волны, которая, таким образом, является поперечной.

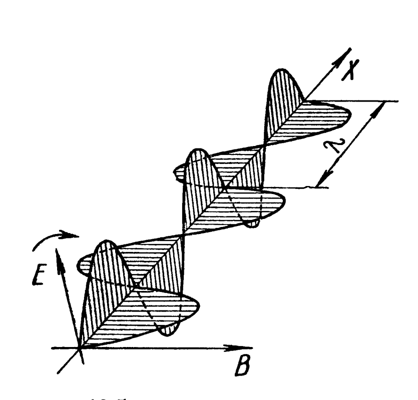


Рис. 16.5

Изобразив графически электромагнитную волну (рис. 16.5), нужно обратить внимание на следующее.

График выражает математическую зависимость модулей векторов $\vec{B}$ и $\vec{E}$ от расстояния и времени распространения электромагнитной волны в точках, лежащих на направлении луча.

Желательно также сообщить учащимся, что направление скорости волны определяется по правилу правого буравчика, вращаемого от вектора $\vec{E}$ к $\vec{B}$ (см. рис. 16.5).

Из курса физики IX класса учащиеся знают, что плотность энергии электрического поля $w_э = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2}$, а плотность энергии магнитного поля $w_м \sim B^2$. В ознакомительном плане можно сообщить, что $w_м = \frac{1}{2\mu\mu_0} B^2$. Опираясь на энергетические преобразования в колебательном контуре, можно также заключить, что $w_э = w_м$ и поэтому полная плотность энергии в волне $w = \varepsilon\varepsilon_0 E^2 \left(\text{или } \frac{B^2}{\mu\mu_0}\right)$.

3. ОТКРЫТЫЙ КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ КОНТУР. ОПЫТЫ ГЕРЦА

Закрытый колебательный контур (рис. 16.6, *а*) излучает незначительную долю энергии, так как его электрическое поле сконцентрировано между обкладками конденсатора, а магнитное — в катушке.

Для излучения электромагнитных волн необходим открытый колебательный контур.

Первым таким контуром был вибратор Герца. Поясняя существо опытов Герца, следует прежде всего помочь учащимся увидеть в вибраторе Герца знакомый им колебательный контур. Для этого целесообразно выполнить серию рисунков, показывающих преобразование колебательного контура с разделенными индуктивностью L и емкостью C в линейный вибратор (рис. 16.6, *г*).

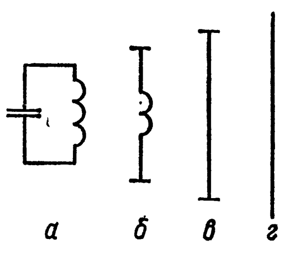


Рис. 16.6

Относительно процесса и механизма движения электрических зарядов в линейном вибраторе можно без изменения повторить все то, что говорилось о движении зарядов в колебательном контуре.

В прямолинейном вибраторе длиной l образуются стоячие волны тока и заряда (напряжения). Пучность колебаний тока находится в середине вибратора, а пучности заряда (напряжения) — на его концах (рис. 16.7). Первое можно показать, включив последовательно в вибратор три лампы (рис. 16.7, *а*), — наиболее ярко светится средняя лампа. Пучности же напряжения легко обнаружить с помощью неоновой лампы, которая, наоборот,

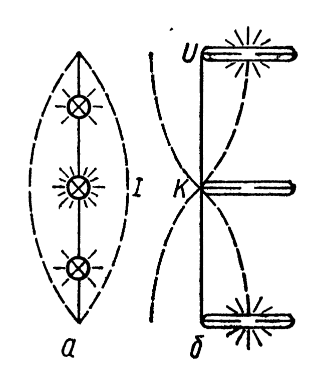


Рис. 16.7

будет ярко светить в том случае, если ее цоколем прикоснуться концов вибратора, и совершенно затухать при перемещении ее по вибратору к его середине (рис. 16.7, *б*). Таким образом, длина излучаемой волны $\lambda = 2l$, а основная собственная частота $\nu = \frac{c}{2l}$.

Определив собственную частоту электромагнитных колебаний вибратора, Герц вычислил и скорость электромагнитной волны $c = 2l\nu$. Она оказалась приблизительно равной 300 000 км/с, как и предсказывал Максвелл.

4. ИЗОБРЕТЕНИЕ РАДИО А. С. ПОПОВЫМ

История изобретения радио замечательным русским ученым и патриотом А. С. Поповым в основных чертах изложена в учебнике [12, § 56]. Дополнительно к сведениям учебника желательно привлечь и другой материал [32; 38; 41; 45].

Одним из серьезных недостатков аппаратуры Герца была крайне низкая чувствительность ее приемной части: волны можно было обнаружить по маленькой искре, рассматриваемой в лупу неутомленным глазом в темноте, притом на расстоянии всего в несколько метров от вибратора. В результате даже сам Герц считал, что его открытие имеет сугубо научно-теоретическое значение и неприменимо на практике.

Александр Степанович Попов (1859—1905) в своих работах главное внимание обратил на увеличение чувствительности приемной части приборов и уменьшение длины электромагнитной волны.

25 апреля (7 мая по новому стилю) 1895 г. на заседании Физического отделения Русского физико-химического общества А. С. Попов продемонстрировал свой прибор, названный им «грозоотметчиком», который, в сущности, содержал все основные части радиоприемника искровой радиотелеграфии, включая антенну и заземление. 7 мая теперь по праву отмечается в нашей стране как День радио.

В средней школе принцип действия приемника А. С. Попова можно продемонстрировать с помощью установки, схематически показанной на рисунке 16.8, в которой диполь с когерером *К* замкнут на батарею через гальванометр. В момент приема электромагнитной волны сопротивление когерера уменьшается, а ток в цепи увеличивается настолько, что стрелка гальванометра отклоняется на всю шкалу. Для прекращения приема сигнала опилки когерера следует встряхнуть, например легкими постукиваниями карандаша. В приемной станции А. С. Попова эту операцию выполнял автоматически молоточек электрического звонка.

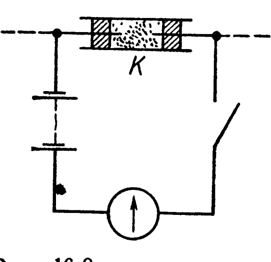


Рис. 16.8

5. ПРИНЦИПЫ СОВРЕМЕННОЙ РАДИОСВЯЗИ. МОДУЛИРОВАНИЕ

Урок следует начать с повторения принципа действия лампового генератора по схеме и демонстрационной установке.

Затем следует сказать, что радиосвязь требует применения электромагнитных волн высокой частоты. Как уже известно учащимся, плотность энергии в электромагнитной волне $w = \varepsilon\varepsilon_0 E^2$.

Поскольку модули векторов $\vec{B}$ и $\vec{E}$ пропорциональны квадрату частоты (ν^2), интенсивность излучения пропорциональна четвертой степени частоты (ν^4). При малой частоте излучение незначительно. Им, например, можно пренебречь для линий переменного тока промышленной частоты.

Путем решения соответствующей задачи учащиеся должны рассчитать, что для волны длиной 10 и 1000 м частота соответственно равна $3 \cdot 10^7$ и $3 \cdot 10^5$ Гц.

Возможность передачи кодированных сигналов, например, по азбуке Морзе, с помощью радиоволн, излучаемых ламповыми генераторами, для учащихся очевидна. Новыми для них являются сведения о способах передачи звуков. Для этого следует изменять параметры излучаемой волны, или, как говорят, модулировать ее.

Незатухающие электромагнитные колебания характеризуются фазой, частотой и амплитудой. Поэтому для передачи сигналов необходимо изменять один из этих параметров.

Амплитудная модуляция применяется радиостанциями для диапазонов длинных, средних и коротких волн. Частотную модуляцию применяют в передатчиках, работающих на ультракоротких волнах.

В средней школе учащихся знакомят только с амплитудной модуляцией. Первоначальное понятие об амплитудной модуляции можно дать с помощью следующего вводного опыта.

Звуковой генератор, который, как известно учащимся, также является ламповым генератором незатухающих колебаний, соединяют с электронным осциллографом и на его экране получают синусоиду. После этого, изменяя с помощью ШРН напряжение, подаваемое на генератор, наблюдают увеличение и уменьшение амплитуды, создавая понятие о возможности ее изменения.

Затем к зажимам низкоомного выхода звукового генератора присоединяют угольный микрофон и, воздействуя на него звучанием камертона, получают осциллограмму модулированных колебаний [12, рис. 111—112].

Дальнейшая задача — изучение техники приема радиоволн, несущих в себе закодированную таким образом информацию, например звуковые колебания (в данном простейшем случае — звучание камертона, а в более сложных — музыку и человеческую речь).

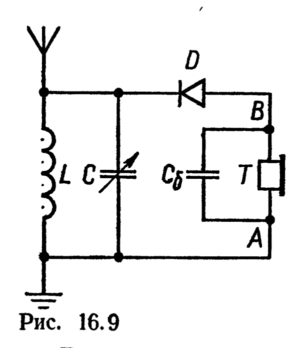


Рис. 16.9

Прием и детектирование модулированных электромагнитных колебаний целесообразно сначала рассмотреть на простейшей схеме детекторного приемника, предварительно повторив сведения об устройстве телефона («Физика-6—7», § 159).

Простейшими приемниками являются уже известный учащимся приемный диполь и антенна, представляющие собой приемный колебательный контур, настроенный в резонанс с контуром передатчика.

Видоизменим схему приемника, включив параллельно конденсатору детектор *D* и телефон *T* (рис. 16.9). А параллельно телефону включим блокировочный конденсатор $C_б$. Это и будет простейшая схема детекторного приемника. Настройка его контура в резонанс достигается изменением емкости *C* и индуктивности *L*.

Через детектор будет течь пульсирующий ток, график которого показан на рисунке 16.10, *а* [12, § 59]. Этот ток далее в точке *A* (рис. 16.9) разветвляется: часть его течет через обмотку телефона *T*, а часть — через конденсатор $C_б$. Обратим внимание на то, что отдельные импульсы тока *1*, *2*, *3* и др. не могут каждый в отдельности создать магнитное поле, способное вызвать перемещение мембраны телефона, обладающей сравнительно большой инертностью[1].

[1] Но если бы даже мембрана и пришла в движение, человек не услышал бы звука из-за огромной его частоты.

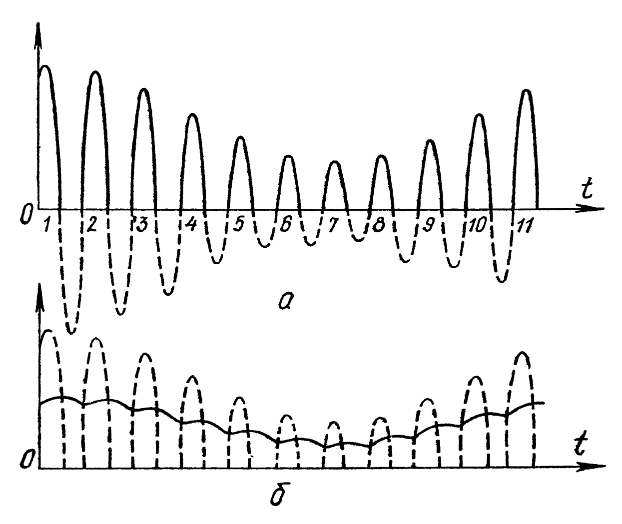


Рис. 16.10

Для пояснения этой мысли полезно рассчитать продолжительность одного импульса тока ($T/2$).

Для волны $\lambda = cT = 600$ м $\frac{T}{2} = \frac{600 \text{ м}}{2 \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}} = 10^{-6}$ с (миллионная доля секунды). Понятно, что за такое малое время в соответствии с законом $\vec{F}\,\Delta t = \Delta\,(m\vec{v})$ мембрана не может приобрести заметного движения.

Но целая совокупность импульсов *1*, *2*, *3* и др., направленных в одну сторону, уже может деформировать мембрану телефона аналогично тому, как удар одной молекулы газа не оказывает заметного действия на мембрану манометра, а действие их огромного числа создает значительную деформацию мембраны.

Допустим, что модулирующий звуковой сигнал имел частоту $\nu = 500$ Гц и, следовательно, полупериод его колебаний $\frac{T}{2} = \frac{1}{2\nu} = 10^{-3}$с. Этому промежутку времени на рисунке 16.10, *а* будут соответствовать 500 импульсов тока *1*, *2*, *3* и т. д.

Аналогичное соотношение получается и для других различных значений частот колебаний несущей и звуковой волн. Приведенные расчеты показывают, что ради наглядности соотношение частот на рисунке 16.10, *а* не соблюдено.

Далее кратко поясняют назначение фильтра или блокировочного конденсатора $C_б$. В тот полупериод, когда детектор не пропускает ток, конденсатор $C_б$ разряжается через телефон, в результате чего в нем все время течет ток, амплитуда которого изменяется со звуковой частотой (рис. 16.10, *б*). Пульсации этого тока и вызывают колебание мембраны телефона.

7. РАДИОПРИЕМНИК С УСИЛИТЕЛЕМ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

Достоинство детекторного приемника — простота его устройства и отсутствие источников питания: приемник использует только ту небольшую энергию, которую получает приемная антенна. Для управления телефоном требуется примерно всего лишь 10^{-8} Вт[1]. Однако для громкого приема радиосигналов, например с использованием динамика даже мощностью 0,1 Вт, чувствительность детекторного приемника далеко недостаточна. Необходимо усиление принятых сигналов.

В этой связи повторяют устройство и усилительное действие трехэлектродной лампы [12, § 29; 57, т. II, изд. 2, опыт 49], используя ее как одноламповый усилитель низкой частоты. После этого

[1] Напомним (см. гл. 15.3), что наименьшая сила звука, который едва улавливается ухом, составляет примерно 10^{-12} Вт/м². При площади мембраны телефона ≈ 5 см² мощность ее излучения должна составлять примерно $10^{-12}\frac{\text{Вт}}{10^{-4}\text{см}^2}\times 5 \text{ см}^2 = 5 \cdot 10^{-8}$ Вт, что подтверждает порядок приведенной выше величины

демонстрируют установку с усилителем для громкоговорящего радиоприемника. В качестве усилителя при хорошей наружной антенне и значительной принимаемой мощности может быть использована даже одна трехэлектродная лампа на демонстрационной панели. Но для уверенного громкого приема необходим усилитель на двух лампах [57, ч. 2, опыт 57].

8. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Перед данной темой учащиеся самостоятельно должны повторить основные сведения о свойствах механических волн (отражение, интерференция и дифракция), а также известные сведения об электромагнитных волнах, излучаемых колебательным контуром (диполем) (см. рис. 16.3, 16.5, 16.9). Обсудив с учащимися указанные сведения, желательно обстоятельнее исследовать поле излучающего диполя.

В любой точке поля лампа в приемном диполе будет светить наиболее ярко лишь тогда, когда диполь расположится по касательной к силовой линии электрического поля. Нетрудно также установить, что если приемный диполь расположить перпендикулярно излучающему, то лампа светить не будет совсем. Следовательно, по диполю можно судить о направлении вектора $\vec{E}$.

Для того чтобы показать значение в электромагнитной волне магнитного поля, нужно воспользоваться проволочным контуром (витком) с неоновой лампочкой.

Во всех случаях, когда переменное магнитное поле вибратора не пронизывает плоскость витка, тока в нем нет и лампочка не светит. Наибольший же ток возникает тогда, когда виток и вибратор находятся в одной плоскости. Эти опыты еще раз показывают, что в электромагнитной волне вектор $\vec{B}$ перпендикулярен вектору $\vec{E}$ и направлен так, что векторы $\vec{E}$ и $\vec{B}$ образуют правовинтовую систему с направлением распространения волны (см. рис. 16.5). Следовательно, по расположению векторов $\vec{B}$ и $\vec{E}$ можно определить направление на передающую радиостанцию (радиопеленгация) [21, т. III, § 59].

Для демонстраций отражения, преломления, интерференции, дифракции и поляризации электромагнитных волн нужно использовать генератор сверхвысокой частоты (СВЧ), длина волны которого $\lambda = 3$ см. Принцип действия, устройство генератора и основные опыты с ним описаны в пособии [84].

Не объясняя учащимся внутреннего устройства генератора, в котором использованы неизвестные для них специальные электронные приборы (отражательные клистроны), ограничиваются замечанием о том, что данный генератор имеет устройство, подобное излучающему диполю, а приемник аналогичен принимающему диполю, но значительно меньше размерами, поскольку длина волны генератора всего 3 см.

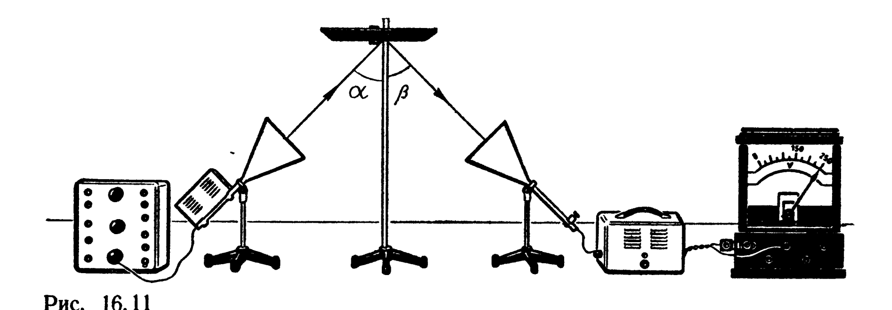


Рис. 16.11

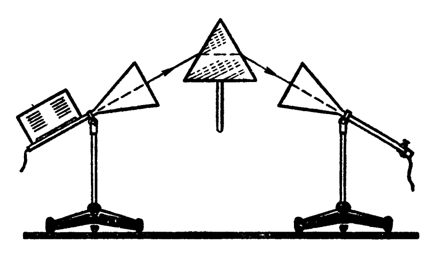
Направленная антенна генератора аналогична рупору, а диффузор приемника — слуховой трубе, концентрирующей энергию волн.

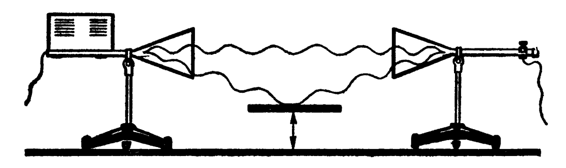
Существо и техника демонстраций по отражению и преломлению волн ясны из рисунков 16.11 и 16.12.

Интерференцию электромагнитных волн показывают сначала на примере стоячих волн, собрав установку, аналогичную той, которая применялась для демонстрации стоячих звуковых волн (см. рис. 15.15). Сантиметровые волны от генератора СВЧ направляют перпендикулярно металлическому листу и с помощью приемного диполя без рупора обнаруживают узлы и пучности электромагнитной волны, подобно тому как для стоячей звуковой волны это делалось с помощью микрофона.

Затем используют схему опыта Ллойда (рис. 16.13), в которой применен метод расщепления одного пучка волн на два, что обеспечивает их когерентность. Перемещая металлический экран в направлении, указанном стрелкой, наблюдают то усиление, то ослабление приема.

Опыты по дифракции электромагнитных волн также аналогичны опытам по дифракции звука (см. рис. 15.17). Для опытов используют щель между металлическими листами и металлический диск. Максимумы колебаний в области геометрической тени диска обнаруживают с помощью дипольного приемника [84, опыт 228].


Рис. 16.12


Рис. 16.13

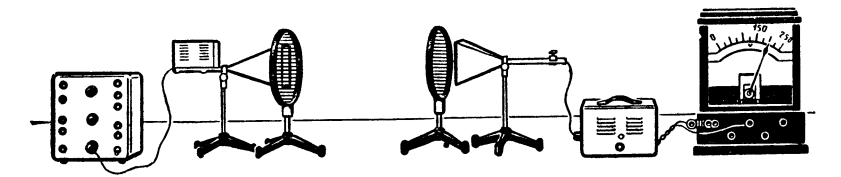


Рис. 16.14

В заключение следует показать на опытах поперечность электромагнитной волны. Сначала, установив приемник против генератора, вращают одну из антенн вокруг волновода и наблюдают постепенное уменьшение громкости сигнала вплоть до его исчезновения при угле поворота 90°. При дальнейшем вращении приемного диполя громкость постепенно увеличивается вплоть до первоначальной, когда угол поворота достигает 180°. Из опытов делают вывод, что излучение генератора является поляризованным.

После этого между генератором и приемником помещают поляризационную решетку и, вращая ее, показывают то усиление, то ослабление принимаемого приемником сигнала (рис. 16.14). Для объяснения явления прибегают к известной аналогии с механическими поперечными колебаниями шнура [12, рис. 212].

Но электромагнитная волна характеризуется двумя векторами: $\vec{B}$ и $\vec{E}$. Какой же из них параллелен щелям поляризационной решетки, когда через них проходит электромагнитная волна? Как показывает теория и опыт, это вектор $\vec{B}$. Дело здесь в том, что если в поляризованной волне параллельным щелям оказывается вектор $\vec{E}$, то в металлических прутьях решетки возникают вынужденные электромагнитные колебания и решетка переизлучает (отражает) электромагнитную волну, которую легко обнаружить с помощью приемника, поставленного с той же стороны от решетки, что и генератор.

9. РАДИОЛОКАЦИЯ

Перед изучением данной темы учащиеся самостоятельно должны повторить материал о звуколокации, интерференции и дифракции волн. По аналогии со схемой звуколокатора (см. рис. 15.8) дают блок-схему импульсного радиолокатора (рис. 16.15). При этом обращают внимание на важность получения радиоволн с узкой диаграммой направленности и использование волн различной длины в соответствии с геометрическими размерами обнаруживаемых объектов.

Далее по аналогии со «звуковым прожектором» и устройством рупорных антенн генератора СВЧ (см. рис. 16.12) поясняют, что повышение интенсивности и направленности излучения достигается благодаря специальной форме антенн, позволяющей использо-

вать отражение и интерференцию электромагнитных волн. Так, например, в диапазоне сантиметровых волн применяются параболические (см. рис. 16.15) и рупорные антенны, а в метровом диапазоне — антенны с плоскопараллельным расположением излучателей.

Направленность излучения увеличивается также с уменьшением длины волны по сравнению с размером антенны (аналогом является образование плоской волны, которая создается колеблющейся пластинкой) (см. рис. 15.1).

Желательно, чтобы к уроку учащиеся подготовили доклады об истории создания радиолокации, ее использовании в период Великой Отечественной войны и в настоящее время, о развитии космической радиолокации [53; 62][1].

Урок следует закончить демонстрацией кинофильма «Радиолокация».

10. РАЗВИТИЕ СРЕДСТВ СВЯЗИ И ТЕЛЕВИДЕНИЯ В СССР

В краткой вводной беседе желательно рассказать учащимся об истории современных средств связи и вкладе в их развитие отечественных ученых.

[1] Можно также рекомендовать книгу: Романов А. Н., Фролов Г. А. Радиолокация — что это? М., 1974.

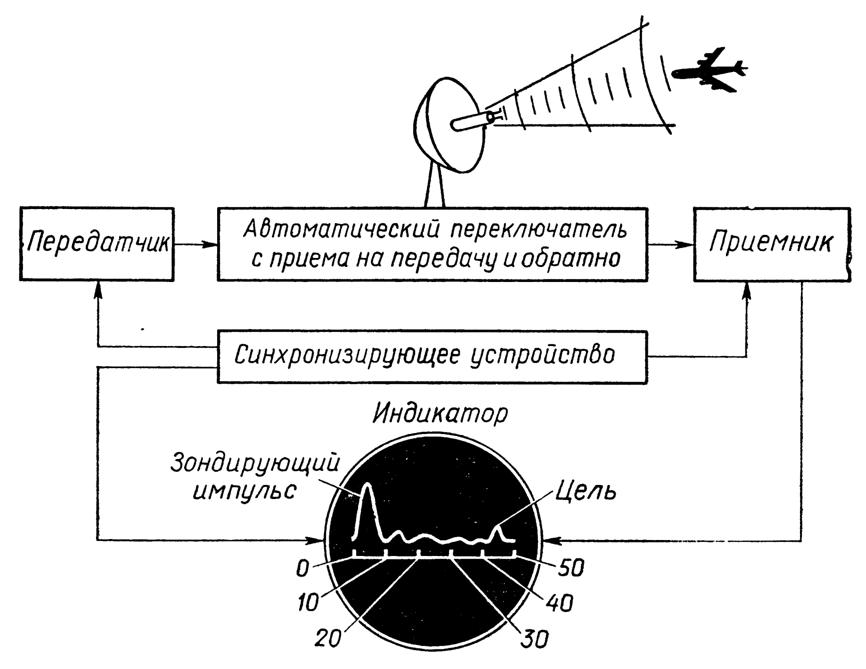


Рис. 16.15

Электромагнитный метод передачи сигналов связан с именами П. Л. Шиллинга (1829), который построил первый практически использовавшийся электротелеграф, и Б. С. Якоби (1839), телеграф которого связывал Зимний дворец со зданием Главного штаба.

В 1835 г. был построен телеграф Морзе, в 1866 г. проложен телеграфный кабель между Европой и Америкой [41].

Следующий этап в развитии связи начинается с изобретения радио А. С. Поповым. Соответствующий исторический материал можно найти в литературе [38; 41; 44; 50]. Но особенно бурное развитие современных средств связи в нашей стране началось после Октябрьской революции. Работам в этой области особое внимание уделял В. И. Ленин[1]. В систематизированном виде сведения для учителя об истории развития радио имеются в книге [68].

Понятие о принципах телевидения [12, § 63] даются учащимся в ознакомительном плане. При этом также необходимо кратко рассказать о вкладе отечественных, особенно советских, ученых в изучение физических процессов, на которых основано телевидение, и в практическое решение его инженерных проблем. Эти сведения об истории развития телевидения, которое началось в СССР раньше, чем в большинстве европейских стран, а также о физических его основах имеются в пособии [97].

Теме желательно посвятить ряд внеклассных мероприятий, в том числе в связи с Днем радио.

ОПТИКА

ГЛАВА 17

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

Изучение геометрической оптики должно опираться на волновую оптику. Этому в большой мере может способствовать вводное занятие по оптике, пропедевтически знакомящее учащихся с идеей о волновой природе света. К этому же школьников подводит и изучение основ теории Максвелла. Опыты с радиоволнами сантиметрового диапазона (отражение, преломление, дифракция) являются хорошим мостиком для перехода к волновым представлениям о свете.

Большое значение оптики в жизни людей, удивительная простота ее геометрических законов и необыкновенное разнообразие отражаемых ими явлений, доступность многих экспериментов со светом даже в домашних условиях, интерес учащихся к оптическим явлениям, богатая история учения о свете, впечатляющие достижения отечественной оптической промышленности — все это при-

[1] См.: Николаев А. М. Ленин и радио. М., 1958.

дает изучению оптики большое методологическое, воспитательное и политехническое значение.

Выделяемое программой время для изучения геометрической оптики может быть распределено так:

1-й урок. Электромагнитная природа света. Прямолинейное распространение света. Световой луч.
2-й урок. Фотометрия. Световой поток, сила света.
3-й урок. Освещенность.
4-й урок. Закон отражения света. Плоское зеркало.
5-й урок. Закон преломления света.
6-й урок. Ход лучей через плоскопараллельную пластинку, через призму.
7-й урок. Полное отражение света.
8-й урок. Лабораторная работа «Определение показателя преломления стекла».
9-й урок. Линза.
10-й урок. Построение изображений в линзе.
11-й урок. Формула линзы.
12-й урок. Лабораторная работа «Определение главного фокусного расстояния линзы, получение изображений в линзе».
13-й урок. Упражнения на построение изображений и расчет действия линзы.
14-й урок. Фотоаппарат, проекционный аппарат.
15-й урок. Глаз, очки, лупа.
16-й урок. Микроскоп. Лабораторная работа «Сборка модели микроскопа».
17-й урок. Обзорное повторение раздела «Геометрическая оптика».

1. ПОНЯТИЕ СВЕТОВОГО ЛУЧА. ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТА

После вводного обзора развития учения о свете, в котором говорится о его волновой природе, опираясь на уже имеющиеся волновые представления учащихся, указываем границы применимости геометрической оптики. Геометрическая оптика изучает законы распространения света для тех случаев, когда можно пренебречь явлениями дифракции. Формируя понятие светового луча, следует отождествить его с известным учащимся понятием волнового луча. Всякий световой поток характеризуется набором лучей, т. е. является пучком.

Применение диафрагм позволяет сузить световой пучок. Однако дифракционное расширение пучка делает невозможным реальное сужение пучка до луча исчезающе узкого сечения, который бы можно было принять за физический образ геометрической прямой. Угол дифракционного расширения пучка, как известно,

определяется отношением $\frac{\lambda}{D}$, где λ — длина волны, а D — диаметр отверстия. Отсюда вытекает, что световой пучок может быть приближенно принят в качестве геометрического «светового» луча при условии, что $\lambda \ll D$. В этом случае дифракционными явлениями на краях отверстий (а также на краях экранов) можно пренебречь[1].

Полезно дать учащимся следующее экспериментальное задание:

Опишите и объясните явления, наблюдаемые на стене, освещаемой лампочкой накаливания, если на пути света находится лист бумаги с отверстием.

На примере анализа данного эксперимента учащиеся не только убедятся в справедливости закона прямолинейного распространения света, но и приобретут первичное понятие о том, что такое изображение, какова роль диафрагм, что такое увеличенное или уменьшенное изображение, прямое и перевернутое, резкое или размытое и как при этом следует учитывать волновые свойства света.

2. ФОТОМЕТРИЯ. СВЕТОВОЙ ПОТОК. СИЛА СВЕТА. ОСВЕЩЕННОСТЬ

Энергия, переносимая светом, является важнейшей характеристикой, определяющей световые действия, а также зрительное восприятие света.

Наш глаз — чрезвычайно чувствительный приемник света. Он может увидеть горящую свечу в полной темноте на расстоянии до 30 км! Порог чувствительности глаза, как определил тонкими измерениями С. И. Вавилов, составляет 2—8 квантов излучения (для зеленого света энергия кванта равна примерно $4 \cdot 10^{-19}$ Дж). Но столь высокая чувствительность глаза относится лишь к излучению очень узкого диапазона волн (0,4—0,8 мкм). Такая избирательность присуща не только глазу, но и многим техническим приемникам света. В связи с этим для характеристики излучения вводятся особые величины и единицы их измерения, связанные с энергетическими характеристиками, но оцениваемые по зрительному восприятию. Важнейшими величинами являются световой поток и сила света.

После введения понятия освещенности и единицы ее измерения — люкса — желательно познакомить учащихся с современными нормами освещенности некоторых рабочих мест и примерами освещенности в природе [26].

---

[1] Следует учесть, что даже при малых углах дифракционное расширение пучка заметно проявится на больших расстояниях до экрана с отверстием. Поэтому более точным критерием применимости геометрической оптики является соотношение $\sqrt{L\lambda} << D$ [21, т. 2, с. 341].

3. ЗАКОНЫ ОСВЕЩЕННОСТИ

Законы освещенности проще всего установить для элементарного точечного источника света. В дальнейшем изложении необходимо постоянно подчеркивать справедливость законов освещенности исключительно для точечных источников.

Теоретический вывод законов освещенности следует подкрепить опытами. Желательно несколько видоизменить рекомендуемую в литературе [57, ч. 2, опыты 63 и 64] методику постановки эксперимента, показав на одной установке влияние и расстояния до источника, и угла падения лучей на площадку. Несложное приспособление для поворота площадки с фоторезистором типа ФС-К1 (из школьного набора по полупроводникам) позволяет изменять как расстояние до источника, так и угол падения лучей. Фоторезистор вставляют в гнезда, имеющиеся в прямоугольной площадке (фанера, картон). Площадка может поворачиваться (с некоторым трением) вокруг металлического стержня, закрепляемого в лапке штатива (рис. 17.1). Спереди к площадке прикрепляют стрелку — «нормаль к поверхности», а на линейке укрепляют (с помощью двух жестяных скобок) сектор с угловыми делениями. В качестве точечного источника света вполне пригодна автомобильная лампочка. Желательно иметь 2—3 лампочки разной мощности для демонстрации зависимости освещенности E от силы света I. Лампочки со стороны класса следует прикрыть непрозрачным экраном (на рис. 17.1 показан пунктиром).

Демонстрации проводят в такой последовательности. Установив площадку нормально к падающим лучам, показывают зависимость показаний гальванометра от освещенности путем изменения накала лампы. Затем включают максимально допустимый ток в лампе и показывают зависимость освещенности от расстояния до лампы. Заменив лампу другой, более мощной, демонстрируют влияние силы света источника на значение освещенности.

Теоретический анализ дает для точечного источника зависи-

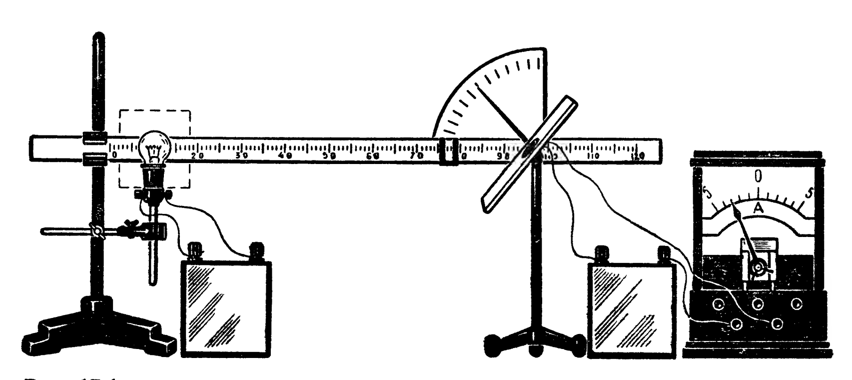


Рис. 17.1

мость: $E_0 = \frac{I}{R^2}$, в полном соответствии с результатами демонстрации.

Установив площадку с фоторезистором на некотором расстоянии от источника, показывают изменение освещенности при повороте площадки. Максимальная освещенность получается при нормальном падении света, нулевая—при скользящем падении. Разъясняют, что один и тот же световой поток Ф может пронизывать как наклоненную к лучам под углом α поверхность (площадь S_α), так и нормальную к лучам поверхность (площадь S_0), причем $S_0 = S_\alpha \cos \alpha$. Поэтому $\Phi = E_0 S_0 = E_\alpha S_\alpha$. Отсюда $E_\alpha = \frac{E_0 S_0}{S_\alpha} = E_0 \cos \alpha$. Окончательно $E_\alpha = \frac{I}{R^2} \cos \alpha$.

При наличии нескольких точечных источников света создаваемая ими освещенность какой-либо поверхности равна сумме освещенностей от отдельных источников, так как световые волны, испущенные различными источниками, некогерентны и не интерферируют.

В заключение изучения темы учащихся знакомят с принципом действия электрического люксметра. С помощью его модели можно поставить ряд экспериментальных задач:

1. Используя автомобильную лампочку с известной силой света (указана на цоколе лампы), проградуировать модель люксметра.

2. Используя модель люксметра, измерить освещенность демонстрационного стола, классной доски.

3. Определить световую отдачу лампы накаливания при различных силах тока, питающих лампу.

Решение. Принимая лампу за точечный источник света, вычисляем полный световой поток, излучаемый ею:

$$\Phi = E \cdot 4\pi R^2,$$

где R — расстояние от лампы до фотоэлемента.

Зная силу тока I и напряжение U, находим световую отдачу $\left(\frac{\Phi}{P}\right)$. Опыт покажет, что, чем больше потребляемая мощность, тем больше и светоотдача.

4. ЗАКОН ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА. ЗЕРКАЛА

Явления, происходящие при попадании волн на границу сред, учащимся уже знакомы (см. рис. 5.13 и 16.12). В геометрической оптике изучается не механизм этих явлений, а геометрические законы распространения.

Показав явление отражения света с помощью аквариума с водным раствором флюоресцина, позволяющего отчетливо «видеть» световые лучи, заключаем, что и световым волнам также присущи

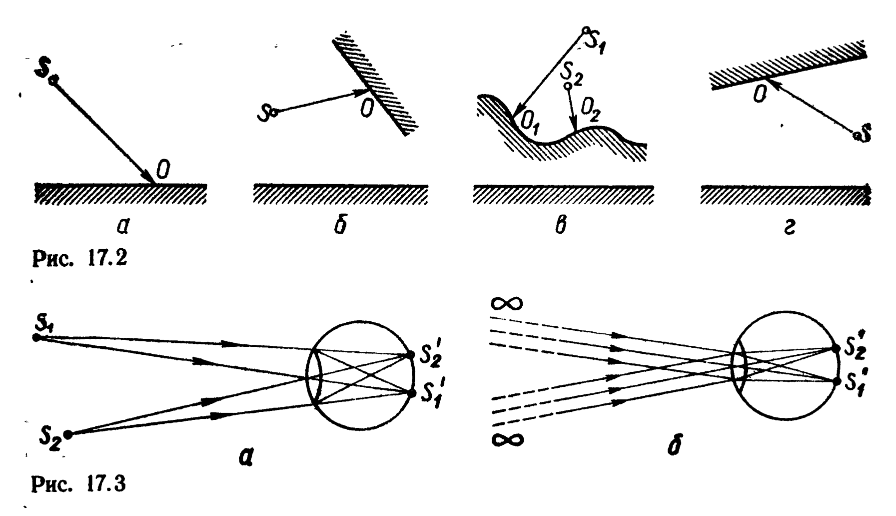


Рис. 17.2

Рис. 17.3

свойства отражения. Опыты особенно эффекты при использовании в качестве источника света лазера, который дает интенсивный световой пучок.

Изменяя угол падения лучей на поверхность воды в ванне, демонстрируем изменение направлений отраженных лучей. Показав опыты с оптическим диском, устанавливаем закон отражения света.

В целях предупреждения ошибок в определении углов падения и отражения желательно предложить учащимся следующее упражнение:

Построить углы падения и отражения для каждого из изображенных на рисунке 17.2 случаев.

Переходя к изучению зеркал, предварительно показываем на опытах два вида отражения: зеркальное и диффузное. Последнее получается на неотшлифованных поверхностях, имеющих неровности порядка 1 мкм и более. Учащиеся склонны иногда считать, что закон отражения справедлив только для зеркал, а не для рассеяния света шероховатой поверхностью. Разъясняем, что на каждом микроучастке шероховатой поверхности свет отражается по закону отражения, но сами отражающие участки ориентированы в пространстве беспорядочно. Благодаря этому рассеянный такой поверхностью свет можно видеть отовсюду (экран кинотеатра!).

Изучению зеркал необходимо предварить повторение сведений о глазе и о процессе восприятия изображений, с которыми учащиеся знакомились ранее в курсе анатомии, физиологии и гигиены человека. Обращаем внимание на то, что хрусталик глаза собирает в точку на сетчатке те лучи, которые вышли из одной точки. Лучи, вышедшие из разных точек и попавшие в глаз, не образуют изображения одной точки: каждый пучок, идущий от близко (рис. 17.3, *а*) или далеко (рис. 17.3, *б*) расположенной точки, дает «свое»

изображение. На задней стенке глаза (сетчатке), как на экране кинотеатра, создается изображение таких точек, и в результате мы видим целые предметы. В дальнейшем мы не будем прослеживать ход лучей в глазу: нам достаточно знать, что мы видим точку (предмет) там, где пересекаются лучи, попадающие в глаз.

После этого разъяснения переходим к исследованию изображения в плоском зеркале. Оно прямое, равное по величине предмету, мнимое. Продемонстрировав изображение лампы накаливания, полученное на экране с помощью линзы, объясняем разницу между действительным и мнимым изображениями: последнее нельзя получить на экране.

При построении изображений в зеркале удобно использовать симметрию относительно плоскости зеркала в расположении предмета и его изображения (рис. 17. 4). При применении этого удобного свойства плоских зеркал у учащихся вызывают затруднения случаи, когда точка (предмет) находится в стороне от зеркала и поэтому, по мнению школьников, перпендикуляр из точки на зеркало «нельзя» провести. В связи с этим полезны упражнения следующего содержания:

1. Часть поверхности зеркала прикрывают непрозрачным экраном. Изменится ли положение изображения точки? Что изменится при наблюдении точки *S* в зеркале?

Ответ. Положение изображения точки *S* не изменится. Изображение будет создаваться не прежним пучком лучей, а суженным пучком. Изображенные пунктиром лучи не участвуют в образовании изображения (рис. 17.5).

2. Экран (см. предыдущую задачу) передвинули так, что он оставил неприкрытым только край зеркала. Где будет наблюдаться изображение точки?

Ответ. Место изображения не изменится и в этом случае, но пучок дающих изображение лучей еще более сузится (рис. 17.6).

Все эти решения желательно проверить экспериментально путем проведения фронтальных лабораторных наблюдений. Поскольку отраженные лучи попадают не во все области пространства, возникает вопрос об области видения. Ее находят путем построения хода крайних отраженных лучей (рис. 17.7). Примером упражнений на эту тему может быть следующая задача:

Какой высоты должно быть плоское зеркало, повешенное вертикально, чтобы человек высотой *H* видел себя в нем во весь рост? На какой высоте должны располагаться нижний и верхний края зеркала?

5. ЗАКОН ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА. ПОЛНОЕ ОТРАЖЕНИЕ

Продемонстрировав опыты по преломлению света в аквариуме с водой, в стеклянной призме и др., даем качественное объяснение: волны «раскачивают» электроны вещества, что вызывает

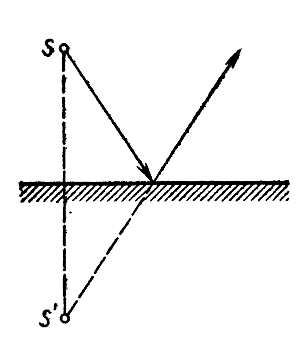


Рис. 17.4

Рис. 17.5

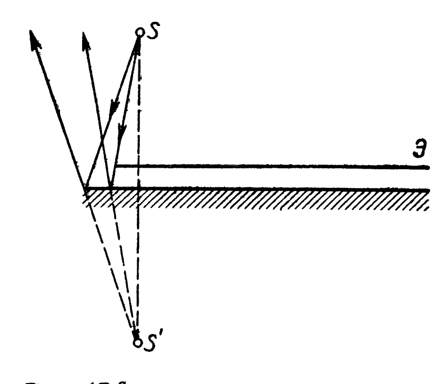


Рис. 17.6

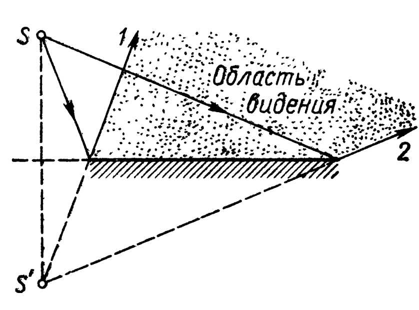


Рис. 17.7

возникновение вторичных волн, частично излучаемых в первую среду, а частично — во вторую, в которой происходит наложение волн. Далее выводим закон преломления [12, с. 168]. Важно при этом установить связь показателя преломления со скоростью распространения волны: $n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2}$. Примерами упражнений здесь могут быть следующие:

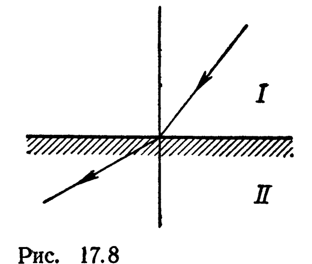


Рис. 17.8

1. На рисунке 17.8 изображен ход луча на границе двух сред. В какой из них скорость света больше? Во сколько раз? (Отраженный луч на рисунке не показан.)

2. Определить скорость света в плоской пластинке, считая скорость света в воздухе известной.

Учащимся полезно запомнить из всех этих примеров и опытов простой вывод, помогающий быстро ориентироваться в явлениях преломления: при переходе через границу луч в оптически более плотных средах ближе «прижимается» к нормали, чем в оптически менее плотных средах.

После исследования соотношения между углами рассматриваем другие черты явления преломления: лучи падающий и преломленный лежат в одной плоскости с перпендикуляром к границе в точке падения; лучи падающий и преломленный обратимы. Эти закономерности аналогичны таким же в явлении отражения. Необходимо обсудить вопрос о том, нарушается ли гомоцентризм лучей при преломлении, другими словами, будут ли лучи, исходящие из одной точки (гомоцентрические лучи) также исходить из одной какой-либо точки после преломления?

Проще всего ответить на этот вопрос геометрическим построением для 3—4 лучей, задавшись определенным показателем преломления (например, 1,5). В результате построения учащиеся убеждаются, что преломление (так же, как и отражение) не нарушает гомоцентризма лучей.

В числе задач можно рассмотреть известное в истории науки явление с кольцом, лежащим на дне чашки и не видимым при наблюдении сбоку. После наливания в чашку воды кольцо становится видимым. Задачу нетрудно сделать экспериментальной.

Явление полного отражения света демонстрируют сначала с помощью оптического диска, а затем — с помощью ванны (аквариума) с раствором флюоресцина, трубы с водой, призм и т. п. [57, ч. 2, опыт 73]. Большой интерес у учащихся вызывает рассказ о волоконной оптике, световодах и миражах [88].

Явлению полного отражения (вместе с дисперсией) обязана и игра света в драгоценных камнях. С помощью полного отражения света легко определить показатель преломления жидкости. С идеей одного такого метода может познакомить учащихся следующая задача:

На дне сосуда высотой h с непрозрачными стенками имеется маленькая лампочка. Сосуд заполнен водой. Каким должен быть минимальный размер фанерного кружка, положенного на поверхность воды, чтобы, глядя сверху, мы не увидели лампочку?

6. ЛИНЗЫ. ФОРМУЛА ЛИНЗЫ

Разъясняют и демонстрируют на опытах действие собирающей и рассеивающей линз. Если линзы имеют утолщение в центре, а по краям — сужение (выпуклые линзы), причем материал линзы оптически более плотен, чем окружающая среда, то фронт волны будет отставать в центре линзы по сравнению с краями (скорость в центре меньше). По этой причине пучок параллельных лучей, падающих на линзу (плоский фронт) превратится в пучок сходящихся лучей.

В случае, когда середина линзы тоньше краев, фронт волны становится выпуклым; линза рассеивает параллельный пучок света. Если материал имеет меньшую оптическую плотность по сравнению с внешней средой, действие выпуклых и вогнутых линз становится обратным тому, о чем говорилось выше. Все эти явления демонстри-

руют с помощью водоналивных линз [57, ч. 2, опыт 75]. Линзы не нарушают гомоцентричности: пучок, вышедший из одной точки, собирается линзой также в одну точку. Это важнейшее свойство линзы подтверждают экспериментально (например, в опытах с оптическим диском)[1]. Рисунок 17.9 иллюстрирует это свойство линзы (пунктирный луч изображен неверно, поскольку после преломления он не прошел через общую точку схождения).

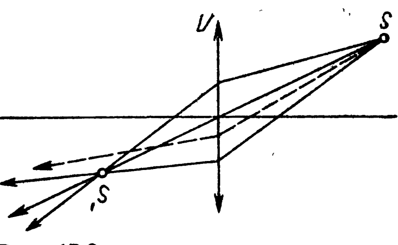


Рис. 17.9

Экспериментально обосновывают свойства особых линий, плоскостей и точек, характеризующих линзу: главной и побочной оптических осей, оптического центра, фокусов линзы, фокальных плоскостей. Нужно уделить внимание побочной оси и побочным фокусам, поскольку при построении изображений в линзах учащиеся затрудняются в необходимых случаях их использовать. Среди упражнений на построение изображений точки должны быть такие:

1. Построить изображение точки, находящейся на главной оптической оси.

2. Построить изображение точки, отстоящей далеко от главной оптической оси. Найти область видения.

Решение задачи ясно из рисунка 17.10.

Формула линзы, как известно, имеет вид

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = (n - 1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right), \quad (1)$$

[1] Реальные линзы проявляют это свойство только для приосевых лучей (т. е. тех, которые образуют малые углы с главной оптической осью). Кроме того, из-за дисперсии свет разной длины волны преломляется по-разному, поэтому лучи разной цветности собираются линзой в разных точках (явление хроматической аберрации).

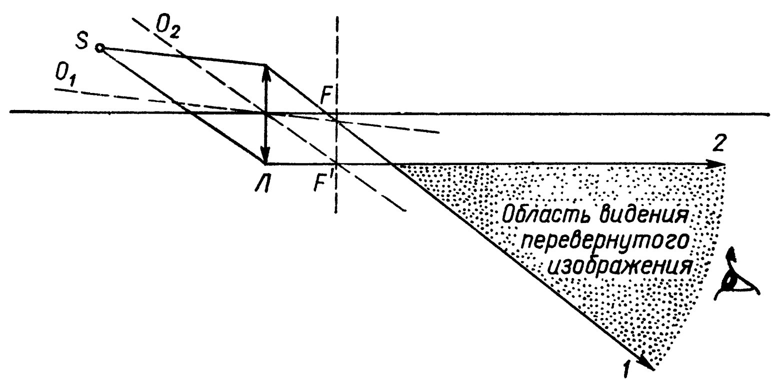


Рис. 17.10

где d и f — соответственно расстояния от центра линзы до предмета и до его изображения, n — показатель преломления вещества линзы относительно внешней среды, одинаковой с обеих сторон линзы; R_1 и R_2 — радиусы кривизны сферических поверхностей линзы.

Формулу линзы можно упростить, если ввести расстояние F от оптического центра до главного фокуса:

$$\frac{1}{d}+\frac{1}{f}=\frac{1}{F}. \qquad (2)$$

В таком виде формулу изучают в школьном курсе физики.

Линейным увеличением линзы называется отношение поперечных к главной оптической оси размеров изображения (H) и предмета (h):

$$\Gamma=\frac{H}{h}=\frac{f}{d}. \qquad (3)$$

Прежде чем выводить формулу (2), следует получить на экране изображения, даваемые линзой при различных f, d и F. После геометрического вывода формулы (2) экспериментально доказывают ее справедливость. Это может быть сделано в виде серии экспериментальных задач:

1. По формуле (2) найти фокусное расстояние данной собирающей линзы.

2. Найти расчетным путем и проверить на опыте, на каком расстоянии от линзы следует поместить экран, чтобы получить изображение предмета, расположенного на определенном расстоянии от данной линзы.

3. Где следует поместить данную собирающую линзу, чтобы получить изображение предмета на экране при заданном расстоянии между ними?

Решения задач необходимо сопровождать вычерчиванием хода лучей.

После того как учащиеся убедятся в справедливости формулы (2) и «почувствуют», как она «работает», сообщают, что она справедлива не только для того частного случая, который рассматривался при выводе формулы (собирающая линза, действительное изображение), но и в более общем случае (произвольная линза — собирающая или рассеивающая и произвольное изображение — действительное и мнимое).

Здесь возможен следующий методический путь. Рассматриваем задачу:

Рассчитать, где получится изображение, даваемое данной собирающей линзой, если предмет находится близко от линзы ($d < F$).

Решение. Применение формулы (2) дает:

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{F}-\frac{1}{d}=\frac{d-F}{Fd}<0 \text{ или } f<0.$$

Обсуждаем полученный результат. Что означает знак «минус»? Построение изображений для случаев $d < F$ показывает, что они являются мнимыми. Следовательно, отрицательный знак f свидетельствует о мнимости изображения.

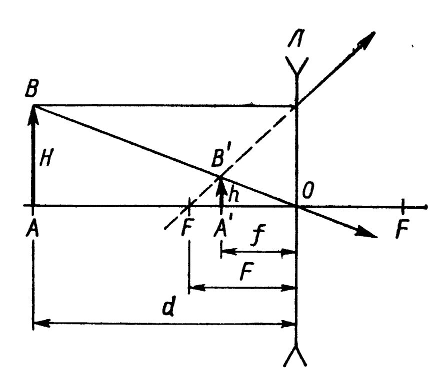


Рис. 17.11

Дальнейшее обобщение формулы (2) проводим, рассматривая рассеивающую линзу.

Предлагаем учащимся (в качестве упражнения) вывести формулу для рассеивающей линзы (рис. 17.11):

$$\frac{1}{d} - \frac{1}{f} = -\frac{1}{F}, \qquad (4)$$

аналогично тому, как это было сделано для собирающей линзы.

Здесь, как и в формуле (2), d, f и F означают модули расстояний. Сравнивая формулы (2) и (4), заключаем, что формулы совпадают с точностью до знаков. В то же время легко обнаружить, что в формуле (4) знак «минус» появился у членов, характеризующих мнимые элементы геометрического построения. Учитывая это, можно формулы (2) и (4) объединить, если условится под d, f и F понимать алгебраические величины, знак которых определяется тем, какие элементы (действительные или мнимые) они характеризуют. Тогда формула линзы будет иметь вид:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}. \qquad (5)$$

7. МНИМОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ

Оба типа изображений — действительное и мнимое — равноправны в том смысле, что они являются точкой пересечения лучей, вышедших из источника света и прошедших через оптическую систему. Но действительное изображение может быть непосредственно получено на экране, а мнимое — нет. В место нахождения действительного изображения попадает излучение, в то время как в место мнимого изображения свет может вообще не попадать, например в случае плоского зеркала. Для воспринимающих же устройств (глаз, фотоаппарат и др.) разницы в наблюдении действительного и мнимого изображений нет: оптическая система этих устройств (например, линза) собирает расходящиеся лучи и возникает действительное изображение, которое мы видим, фотографируем или проецируем на экран.

Для зеркал положение мнимых изображений можно найти простым и эффектным способом. Взяв в качестве плоского зеркала стеклянную пластинку и установив перед нею свечу, подбираем положение второй свечи за пластинкой так, чтобы она совпала с

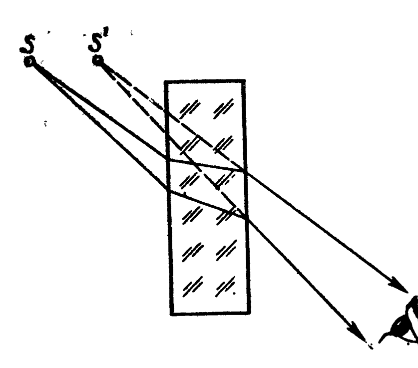


Рис. 17.12

изображением. Затем зажигаем переднюю свечу. При этом появляется «пламя» и у второй свечи (за стеклом). Поднеся ладонь к «пламени» задней свечи, показываем, что ее «пламя» не обжигает, это мнимое изображение.

У учащихся нередко создается впечатление, что мнимые изображения создаются только зеркалами и линзами. Это неверно. Такое изображение может получиться в результате действия любой оптической системы, в которой используются явления отражения и преломления света. В качестве примера при изучении плоскопараллельной пластинки учащимся можно предложить вопрос: «Какое изображение мы видим, рассматривая предмет сквозь плоскую пластинку?» Аналогичный вопрос можно обсудить при анализе задачи о видимой глубине водоема и др. Рисунок 17.12 показывает, как получается мнимое изображение при рассмотрении точки через плоскопараллельную пластинку.

8. ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ. ГЛАЗ

Со стеклами (типа линз), а также с металлическими зеркалами люди были знакомы еще в глубокой древности, но начало сравнительно массового производства оптических стекол относится к XIII в.

Развитие мореплавания потребовало создания зрительной трубы (Голландия, 1608 г., Иоганн Липерсгей — шлифовщик очков).

Великий Галилей, узнав о создании в Голландии зрительной трубы, сам построил зрительную трубу (1609) и первым применил ее для изучения неба.

В XVII в. появились первые микроскопы. Голландец Левенгук прославился своими микроскопами, которые давали увеличение до 270 раз.

В настоящее время существует множество оптических приборов различного назначения: фото- и киноаппараты, микроскопы, телескопы, приборы контроля и измерений различных параметров технологического процесса, спектральные приборы, дальномеры, приборы для видения в темноте и много других.

Больших успехов достигла советская оптическая промышленность. Их рассмотрение на уроках и во внеурочной работе может сыграть важную воспитательную роль[1].

---

[1] Интересный материал можно найти в журнале «Физика в школе», 1977, № 1.

В разделе «Геометрическая оптика» школьного курса физики предусмотрено изучение оптических устройств, которые можно подразделить на две группы: проекционные приборы (они дают действительное изображение на экране или фотопленке) и приборы, вооружающие глаз (лупа, микроскоп, телескоп).

Фотоаппарат, проекционный аппарат. На примере какого-либо фотоаппарата (предпочтительнее крупногабаритный пластиночный) показывают его устройство (объектив, камера, затвор, диафрагма, место нахождения пластинки или пленки). Кратко рассматривают сущность процессов в фотохимическом слое. При этом обращают внимание на то, что степень почернения светочувствительного слоя зависит от его чувствительности и от полной световой энергии, попавшей на данное место пластинки или пленки. Энергия, в свою очередь, определяется временем выдержки и освещенностью изображения. Демонстрируют получение действительного, уменьшенного перевернутого изображения на матовом стекле пластиночного аппарата. Предлагают начертить ход лучей в фотоаппарате, считая объектив собирающей линзой.

Разъясняют роль диафрагмы: с ее помощью регулируется освещенность изображения, а также глубина резкости. В осведомительном плане рассказывают об относительном отверстии и светосиле. Изображение находится от объектива на расстоянии, приблизительно равном фокусному расстоянию F; линейный размер изображения пропорционален расстоянию до объектива (линзы), вследствие этого площадь изображения обратно пропорциональна квадрату фокусного расстояния. Световой поток, образующий изображение, пропорционален квадрату диаметра отверстия (диафрагмы) D. Отсюда ясно, почему светосила объектива, определяющая освещенность изображения, измеряется квадратом отношения $\frac{D}{F}$. На объективах фотоаппаратов указывают не светосилу, а относительное отверстие $\frac{D}{F}$ (в виде дроби), например 1 : 4,5; 1 : 6,3, при этом пишется только знаменатель дроби (например, 4,5; 6,3 и т. д.). Лучшие объективы имеют относительное отверстие до 1. Относительное отверстие регулируется диафрагмой.

При объяснении устройства и действия проекционного аппарата обращают внимание на назначение конденсора, обеспечивающего яркое освещение диапозитива или другого проецируемого объекта.

Глаз как оптическая система. Анатомическое строение глаза подробно изучается школьниками в курсе анатомии и физиологии человека[1]. Учащиеся получают представление об образовании изображения на сетчатке, о явлении аккомодации (без термина), о строении сетчатой оболочки (колбочки и палочки), о недостатках

---

[1] См.: Цузмер А. М., Петрушина О. Л. Человек. Анатомия, физиология, гигиена. М., 1979.

зрения (близорукость и дальнозоркость и способы их устранения), о некоторых особенностях зрительного восприятия внешнего мира (например, перевернутость изображения на сетчатке и приспособленность мозга создавать правильное впечатление о наблюдаемом объекте) и другие сведения.

Разрешающая способность глаза связана прежде всего со структурой сетчатой оболочки: глаз воспринимает две наблюдаемые точки раздельно, если их изображения попадают на различные нервные окончания. Для нормального глаза минимальный размер изображения составляет примерно 3,6 мкм. Этому соответствует угол зрения около одной угловой минуты, что и следует считать пределом разрешающей способности глаза.

Рассматривая оптическую систему глаза, полезно сравнивать ее с устройством фотоаппарата. Но, в отличие от фотоаппарата, наводка на резкость достигается не перемещением «объектива» хрусталика, а изменением его оптической силы.

Учащиеся должны понять, что процесс видения не заканчивается формированием изображения на сетчатке, а, по сути, только начинается с этого. Основной — решающий — этап происходит в мозгу, перерабатывающем полученную от глаза информацию и создающем окончательный образ увиденного объекта. При этом мозг «отфильтровывает» от изображения все то, что не относится к изображаемой картине, а связано с дефектами глаза или его оптическими особенностями. Немалую роль играет и накапливаемый человеком жизненный опыт, знания, практика повседневной жизни. Так, например, изображение на сетчатке (как это и полагается действительному изображению) перевернуто, но мы воспринимаем внешний мир нормально[1].

Лупа. Микроскоп. Роль лупы выясняют, решая задачу: «Как увеличить угол зрения при рассматривании близких предметов?» Необходимо приблизить предмет. Но приближать очень близко нельзя из-за предела аккомодации глаза. Отсюда вывод: нужно «помочь» глазу сводить изображение на сетчатку, для чего можно применить собирающую линзу и тем самым увеличить оптическую силу системы.

Для лучшего уяснения действия лупы и приобретения навыков работы с нею желательно пронаблюдать действие лупы, найти наиболее удобное для глаза положение лупы относительно предмета и глаза.

Сравнивая расстояние от лупы до предмета с ее фокусным расстоянием, учащиеся делают вывод, что предмет удобно помещать

[1] Убедиться в этом можно так. Проделав иголкой маленькое отверстие в листе картона, рассматриваем через него нить лампы накаливания. Пронося между глазом и картоном проволочку (например, снизу вверх), мы увидим, что тень от нее перемещается на фоне светлого изображения отверстия в обратном направлении (сверху вниз). Можно поместить вертикальную булавку головкой вверх; тогда ее тень на сетчатке мы увидим перевернутой. Ориентировочные расстояния: от картона до глаза — 5 см, от булавки до глаза — 2—3 см.

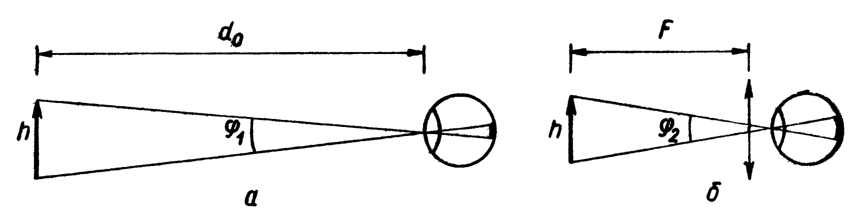


Рис. 17.13

вблизи фокальной плоскости лупы (между линзой и фокусом). В этом случае получаются параллельные пучки лучей, воспринимаемые глазом без напряжения. Для оценки увеличения лупы устанавливают параллельно две линейки с миллиметровыми делениями. Одну из них рассматривают через лупу, а другую — без лупы.

Изменяя расстояние от глаза до лупы, учащиеся убеждаются в том, что это практически не влияет на увеличение лупы. Поэтому при выводе формулы увеличения лупу можно считать расположенной вблизи глаза (при этом получается наибольшее поле зрения). Учитывая это, можно углы зрения найти из схематических рисунков 17.13, *а*, *б*: $\varphi_1 = \frac{h}{d_0}$; $\varphi_2 = \frac{h}{F}$. Это дает угловое увеличение $\Gamma = \frac{\varphi_2}{\varphi_1} = \frac{d_0}{F}$. Упражнениями для учащихся могут быть следующие вопросы:

1. Одинаковое ли увеличение дает лупа с фокусным расстоянием F для дальнозоркого, близорукого и нормального глаза?

Ответ. Так как d_0 различно, то и увеличение, даваемое одной и той же лупой, будет различно: наибольшим — для дальнозоркого глаза, наименьшим — для близорукого.

2. Можно ли применять в качестве лупы линзу с фокусным расстоянием 0,25 м?

Ответ. В данном случае $F = \frac{25}{25} = 1$. Линза не дает увеличения.

Поскольку увеличение зависит от F, можно, казалось бы, уменьшением F добиться какого угодно увеличения с помощью лупы. Например, при $F = 1$ мм увеличение могло бы быть $\frac{250}{1} = 250$! Однако такое увеличение явно бесполезно, ввиду того что размеры лупы были бы порядка 1 мм, что меньше зрачка глаза (3 мм). Дифракция на краях такой линзы была бы значительнее, чем дифракция на зрачке. Вследствие этого лупа с таким большим увеличением сильно искажала бы наблюдаемую картину.

Для получения больших увеличений применяют микроскопы. В них короткофокусный объектив создает действительное изображение предмета, которое рассматривается в окуляр, как в лупу.

Для оценки оптимального увеличения, даваемого микроскопом, можно сделать следующий прикидочный расчет. Минимальное поперечное расстояние, разрешаемое невооруженным глазом, найдем из формулы $\frac{h_{min}}{d_0} = \frac{2\pi}{21\,600}$, учитывая угловой предел в 1' и полагая, что предмет расположен на расстоянии наилучшего зрения. Здесь справа стоит значение предельного угла в радианах. Расчеты дают: $h_{min} \approx 8{,}5 \cdot 10^{-3}$ см. При использовании тысячекратного увеличения получится наименьший размер предмета, разрешаемый системой: $h \approx 10^{-5}$ см. Длина волны видимого света порядка 10^{-5} см. Таким образом, увеличение порядка 1000 позволяет видеть раздельно две точки, расстояние между которыми сравнимо с длиной волны. Вследствие значительной дифракции света на таких объектах невозможно «увидеть» более мелкие детали. Следовательно, 10^3 — это, действительно, предельное увеличение микроскопа (оптимальным же надо считать 600).

Вывод формулы увеличения микроскопа не требуется программой, однако учащимся, проявляющим к данному вопросу интерес, можно предложить задачу, помогающую уяснить суть упрощенного расчета.

Составлена модель микроскопа из двух собирающих линз с фокусными расстояниями $F_1 = 10$ мм (объектив), $F_2 = 50$ мм (окуляр). Предмет находится на расстоянии $d_1 = 12$ мм; окуляр действует как лупа. Каково увеличение системы?

Указание. При анализе работы оптической системы учащиеся должны последовательно рассмотреть действие оптических элементов, считая изображение от предыдущего элемента предметом для последующего элемента.

9. ОБОБЩАЮЩЕЕ ПОВТОРЕНИЕ

Целью повторения является выделение главных моментов раздела «Геометрическая оптика», обобщение основных понятий, а также рассмотрение примеров проявления законов оптики в природе и применения их в технике. (Последние вопросы могут быть темами сообщений учащихся с хорошо подготовленными наглядными материалами.)

Занятие удобно проводить в форме семинара. Для подготовки к нему учащимся может быть предложен следующий план:

1. Основные законы геометрической оптики, границы их применимости.
2. Методы измерения показателя преломления вещества, его физический смысл.
3. Способы управления световыми пучками (применение линз, зеркал, призм для изменения формы пучков и их направления).
4. Как получаются изображения предметов с помощью оптических приборов? Виды изображений.
5. Связь характера изображения с положением предмета относительно линзы.
6. Методы измерения фокусного расстояния линзы.
7. Принцип действия проекционных приборов и приборов, вооружающих глаз.

Для докладов учащихся могут быть предложены следующие темы:

1. Явления отражения и преломления света в природе.
2. Оптические приборы в народном хозяйстве.
3. Волоконная оптика, перспективы применения.
4. Кино; его физические принципы, значение в науке и технике, культуре.
5. Фотография в науке, культуре, технике.

Доклады следует сопровождать демонстрацией отрывков из фильмов, эпидиапроекцией фотографий, чертежей и применять различную проекционную аппаратуру.

ГЛАВА 18

СВЕТОВЫЕ ВОЛНЫ

Тема «Световые волны» завершает «волновой концентр» курса физики X класса. Ее изучение основывается на имеющихся у учащихся сведениях по геометрической оптике, а также о колебаниях и волнах.

Как завершающая, эта тема позволяет обобщить и повторить важнейшие понятия о колебаниях и волнах различной природы, познакомить учащихся с развитием взглядов на природу света.

Тема имеет очень большое значение для формирования диалектико-материалистического мировоззрения учащихся (материальность света, корпускулярно-волновой дуализм, вопросы теории относительности и др.).

В данной теме в основном выясняется только одна — «волновая» — сторона световых явлений. Однако учащиеся должны помнить о дуализме света, первое представление о котором они получили во «Введении» к оптике [12, с. 126—128]. Для сохранения и развития этих первоначальных понятий там, где это возможно, корпускулярные представления о свете следует использовать параллельно с волновыми.

Основными вопросами темы являются природа света и его распространение. Неизбежно затрагивается вопрос и о взаимодействии света с веществом.

Согласно программе в данной теме основное внимание уделяется:

1) скорости света как предельной скорости перемещения любого физического объекта и важнейшей физической константе;

2) волновым свойствам света (на примере интерференции и дифракции).

В ознакомительном плане дается также понятие о поперечности световых волн (на примере поляризации света).

Распределение материала по урокам видно из следующего примерного планирования:

1-й урок. Свет — электромагнитные волны. Скорость света.
2-й урок. Законы отражения и преломления света.

3-й урок. Дисперсия света. Цвета тел. Лабораторная работа «Наблюдение явления разложения света при помощи призмы».

4-й урок. Интерференция света. Кольца Ньютона. Лабораторная работа «Наблюдение явления интерференции света».

5-й урок. Длина световой волны. Частота колебаний.

6-й урок. Дифракция света. Принцип Гюйгенса — Френеля.

7-й урок. Дифракционная решетка. Лабораторная работа «Наблюдение явления дифракции света».

8-й урок. Упражнения. Решение задач.

9-й урок. Поляризация света. Поперечность световых волн.

10-й урок. Развитие взглядов на природу света.

11-й урок. Контрольная работа.

1. СВЕТ — ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ. СКОРОСТЬ СВЕТА

Ко времени изучения указанного материала учащиеся уже знают, что свет — это электромагнитные волны. Но свет испускается веществом, например раскаленными телами. По аналогии с излучением диполя следует предположить, что и атомы вещества, излучающие свет, представляют собой своего рода микровибраторы. Таким образом, сначала используются представления классической теории излучения, согласно которой электрон в атоме движется вокруг ядра по эллиптической боровской орбите. Это движение, как и механическое движение точки по окружности, можно разложить на два взаимно перпендикулярных гармонических колебания и, следовательно, свести излучение атома к излучению микровибратора[1].

В соответствии с волновой теорией атом излучает свет, т. е. электромагнитные волны, вызванные почти гармоническими медленно затухающими колебаниями электронов. По современным данным, время колебаний (время жизни возбужденного атома или время его «высвечивания») τ составляет 10^{-8}—10^{-9} с. За это время образуется цуг волн, длина которого $l = c\tau$ равна 0,3—3 м. Число волн в цуге для средней части спектра при $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$ м равно $n = \frac{l}{\lambda} = 6 \cdot 10^6$. (В квантовой теории цугу волн соответствует испускание фотона.)

Приступая к изучению вопроса об измерении скорости света,

[1] Главный недостаток данной модели заключается в том, что она не может объяснить, почему не излучает невозбужденный атом, хотя движение электронов по его орбитам является ускоренным. Объяснение, как известно, дает только квантовая теория. Несмотря на это, классическая теория излучения также позволяет получить ряд важных выводов, подтверждающихся на опыте. См.: Фабрикант В. А. О классической теории излучения.— Физика в школе, 1974, № 1.

полезно сначала показать, какие технические трудности пришлось преодолеть ученым [68, рис. 6.1; 27, № 857—859].

После этого знакомят учащихся с астрономическим (Ремер) и лабораторным (Физо) способами определения скорости света [12, § 81; 27, № 860].

Представление об измерении скорости света по методу Майкельсона учащиеся могут получить при решении задачи, имеющейся в учебнике [12, упр. 10]. Желательно также познакомить учащихся с лабораторным способом измерения скорости света в воде, примененным Фуко. В зависимости от подготовки учащихся можно кратко объяснить только идею данного опыта или же выполнить полностью соответствующие расчеты, которые покажут, что скорость света в воде меньше, чем в вакууме, и составляет примерно $2{,}3 \cdot 10^8$ м/с [21, т. III, с. 394; 27, № 861].

Наконец, учащиеся должны уметь определять скорость света в среде с помощью закона преломления $\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{c}{c_{ср}}$. Отсюда скорость света в воде $c_в \approx 2{,}3 \cdot 10^8$ м/с, что совпадает с данными прямых измерений, выполненных Фуко, и, следовательно, подтверждает волновую теорию света Гюйгенса.

При этом, однако, обращаем внимание учителя на следующее. С помощью упомянутых выше лабораторных методов определения скорости света в какой-либо среде (в воздухе или воде) и с помощью закона преломления определяют, вообще говоря, различные величины, соответственно групповую u [см.: 9, с. 292] и фазовую v скорости. Ведь в какой-либо среде, например воде, скорость света для различных длин волн различна (этот вопрос следует подробнее рассмотреть при изучении дисперсии). Только при незначительной дисперсии $u \approx v$. Так, например, дисперсией практически можно пренебречь для воздуха. Сравнительно невелика дисперсия света в воде. Этим и объясняется примерное совпадение (до второго знака) значения $c_в$, полученного в опытах Фуко, и значения, найденного по закону преломления света. Но более точные расчеты непременно выявят различие в скорости световых волн различной длины. Поскольку понятие групповой скорости волны в средней школе учащимся не дается, то, говоря о скорости света в какой-либо среде, следует иметь в виду скорость определенной монохроматической волны.

2. ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА КАК ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Приступая к изучению темы, следует обобщить известные учащимся сведения об отражении механических и электромагнитных волн, в том числе и световых волн [12, § 69], обратив особое внимание на принцип Гюйгенса. После этого кратко повторяют известные из геометрической оптики сведения о преломлении света [12, § 72] и дают вывод закона преломления света с помощью волно-

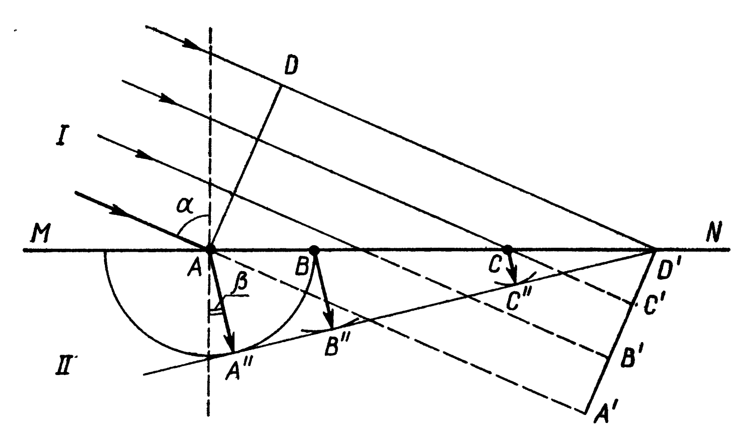


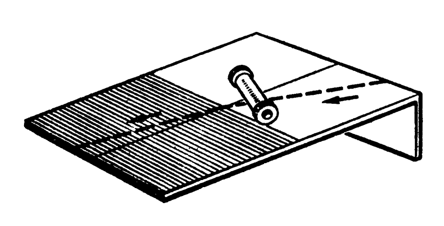
Рис. 18.1

вой теории [12, § 82]. Как вариант доказательства, закон преломления света в целях «историзма» можно получить с помощью построений, которыми пользовался сам Гюйгенс (рис. 18.1). Допустим, что плоская волна AD падает на границу MN раздела двух сред: I и II. Если бы скорость волны во второй среде v_2 была бы такой же, как и в первой, т. е. v_1, то через некоторое время $\Delta t = \frac{DD'}{v_1}$ фронт волны занял бы положение $A'D'$. Но допустим, как говорил Гюйгенс, что скорость во второй среде на треть меньше, чем в первой.

Тогда радиусы элементарных сферических волн, испускаемых точками A, B, C, будут также меньше на 1/3 и, следовательно, фронт волны займет положение $A''D'$. Далее отметим, что $\alpha = \angle AD'A'$; $\beta = \angle AD'A''$, как углы с взаимно перпендикулярными сторонами. Поэтому можно записать:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{AA'}{AD'} : \frac{AA''}{AD'} = \frac{AA'}{AA''} = \frac{v_1\Delta t}{v_2\Delta t} = \frac{v_1}{v_2} = 1{,}5.$$

В качестве мнемонического правила для запоминания того, как изменяется направление луча при преломлении, полезно прибегнуть к следующей аналогии. Если лист фанеры наполовину заклеить ворсистой тканью (фланелью) и наполовину гладкой бумагой, а затем по нему под углом при небольшом уклоне скатить катушку (рис. 18.2), то на границе бумага — фланель часть катушки затормозится и она изменит направление своего движения подобно лучу при переходе из одной среды в другую.


Рис. 18.2

Задавшись определенной скоростью движения обеих частей катушки, можно получить «закон преломления». Эту задачу полезно дать учащимся в качестве самостоятельного задания.

3. ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

Явление дисперсии света было открыто И. Ньютоном и считается одной из важнейших его научных заслуг. Недаром на его надгробном памятнике, поставленном в 1731 г. и украшенном фигурами юношей, которые держат в руках эмблемы его главнейших открытий, одна фигура держит призму, а в надписи на памятнике есть слова: «Он исследовал различие световых лучей и появляющиеся при этом различные свойства цветов, чего ранее никто не подозревал»[1]. Последнее утверждение не совсем точно. Дисперсия была известна и ранее, но обстоятельно она не изучалась.

Перед изучением данной темы учащиеся должны повторить материал о преломлении волн, в том числе световых [12, § 72], и ход лучей в треугольной призме.

В классе следует напомнить учащимся, как преломляет электромагнитные волны призма из диэлектрика (см. рис. 16.12) и световые монохроматические пучки (т. е. тоже электромагнитные волны, но значительно меньшей длины) стеклянная призма.

Опыт с преломлением монохроматического пучка следует показать дважды, используя призмы из разного стекла (флинт и крон). При этом для обоих случаев нужно построить падающий и преломленный лучи и записать соотношение $\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}=\frac{n_2}{n_1}=\frac{c_1}{c_2}$, где c_1 и c_2 — соответственно скорость электромагнитных, в данном случае световых, волн в первой и второй средах.

Опыты еще раз подтверждают, что скорость электромагнитных волн (так же, как и звуковых) зависит от среды.

После этого ставят проблемный опыт по дисперсии белого пучка света. Для демонстрации спектра в классе желательно использовать призму из крона и возможно более сильный источник света [57, ч. 2, опыт 81].

Можно для получения спектра пользоваться и призмой прямого зрения, кратко пояснив учащимся ее устройство. Применив красный, желтый и синий светофильтры, обнаруживают, что красные, желтые и синие лучи ложатся на те же места экрана, где были участки одноименной окраски, и уже не разлагаются на другие световые пучки.

Ставят также известные опыты по сложению спектральных цветов с получением белого света. Из опытов делают вывод о сложном составе белого света, разном коэффициенте преломления различ-

---

[1] Цитируется по кн.: Спасский Б. И. История физики. М., 1963, ч. 1, с. 123.

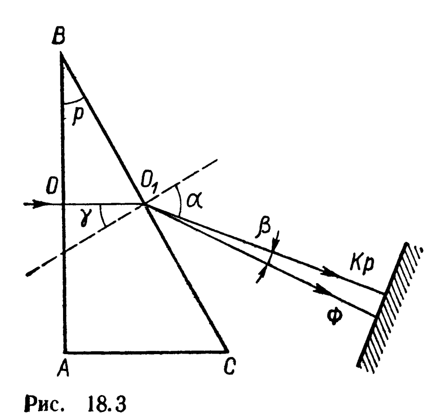


Рис. 18.3

ных электромагнитных волн и, следовательно, их разной скорости в какой-либо одной среде.

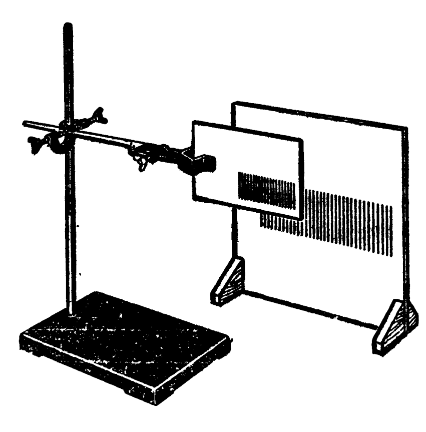
Для закрепления и углубления материала полезно решить следующие задачи:

1. Красный ($n_к = 1,640$) и фиолетовый ($n_ф = 1,690$) лучи света падают в одну точку *O* перпендикулярно грани трехугольной стеклянной призмы из тяжелого крона (рис. 18.3). На какой угол β разойдутся лучи при выходе из призмы? Где нужно поместить экран, чтобы расстояние между лучами было равно 10 см? Преломляющий угол призмы $p = 10°$. [27, № 866.]

Решение этой задачи можно использовать для того, чтобы дать учащимся понятие о хроматической аберрации. Линза, которую известным образом можно представить как совокупность призм, имеет столько фокусов, сколько различных цветов содержит падающий на нее свет.

2. В воде на расстоянии 20 м один аквалангист подает сигнал другому с помощью белого света. На какое расстояние Δl и на какое время Δt на этом пути красные лучи опередят фиолетовые? Показатель преломления красных лучей $n_к = 1,329$; фиолетовых — $n_ф = 1,344$. [27. № 865.]

Ответ. $\Delta t = 9,9 \cdot 10^{-6}$ с; $\Delta l = 0,22$ м. Заметить такую разницу во времени прихода световых сигналов глаз человека не может. Поэтому он не обнаружит разложение света. Однако в принципе можно поставить мысленный опыт, который бы позволил таким образом обнаружить дисперсию световых волн в среде.


Рис. 18.4

Помимо видимых, следует обнаружить существование инфракрасных и ультрафиолетовых лучей. Инфракрасные лучи обнаруживают с помощью термостолбика или сернистосеребряного фотоэлемента ФЭСС-У10, которые присоединяют к гальванометру (см. рис. 14.2). Можно также использовать фоторезисторы типа ФС-АО, ФС-А1 и др., включив их последовательно с демонстрационным гальванометром и анодной батареей. Ультрафиолетовые лучи обнаруживают с помощью рентгенов-

ского экрана с платиносинеродистым барием. При помещении этого экрана в области коротких лучей спектр становится длиннее (рис. 18.4). В качестве осветителя лучше всего использовать ртутно-кварцевую лампу ПРК-4.

4. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

Перед изучением данной темы учащиеся должны повторить известный им материал об интерференции механических (см. рис. 15.9, 15.10) и электромагнитных (см. рис. 16.13) волн.

По аналогии с интерференцией этих волн следует заключить, что обязательное условие интерференции света — когерентность световых волн, испускаемых атомами вещества. Поскольку световые волны, как всякие электромагнитные волны, являются поперечными, помимо постоянства разности фаз, необходимо также постоянство направления плоскости колебаний.

Этим условиям отвечают волны одного цуга, испускаемые каким-либо атомом. Однако на практике обычно имеют дело с источниками света, которые состоят из огромного числа атомов, хаотически испускающих цуги волн с самыми различными разностями фаз и всевозможными направлениями плоскостей колебаний. Поэтому получить интерференционную картину, используя свет от двух независимых источников, например от двух звезд или различных точек светящегося тела, невозможно.

Но интерференцию света можно осуществить, воспользовавшись идеей Юнга и Френеля о разделении светового пучка на две части, которые затем снова сводятся вместе.

Таким образом, можно заставить практически интерферировать волны одного и того же цуга при условии, если разность их хода не превышает 30 см. Интерференцию света можно продемонстрировать и объяснить разными методами и на примере различных явлений (зеркала и бипризма Френеля, зеркало Ллойда, метод Юнга, кольца Ньютона, воздушный клин, цвета тонких пленок и др. [см.: 68]). По аналогии с интерференцией механических волн и в целях историзма особого упоминания заслуживает прежде всего классический и наглядный по идее опыт Юнга с интерференцией световых волн от двух близко расположенных «точечных» источников света. Однако он не пригоден для демонстрации в классе и, кроме того, изучается позднее в связи с дифракцией света [12, § 88]. Не демонстрируется со школьным оборудованием и опыт Ллойда. Поэтому, кратко упомянув при повторении материала о возможности получения интерференции света такими методами, обращаются далее к хорошо освоенному в школе опыту с бипризмой Френеля. При этом, не усложняя схему опыта (рис. 18.5) построением мнимых источников света [21, т. III, с. 342], по аналогии с опытом, выполненным ранее при изучении электромагнитных волн (см. рис. 16.13), поясняют, что интерференция света, например в точке *D*,

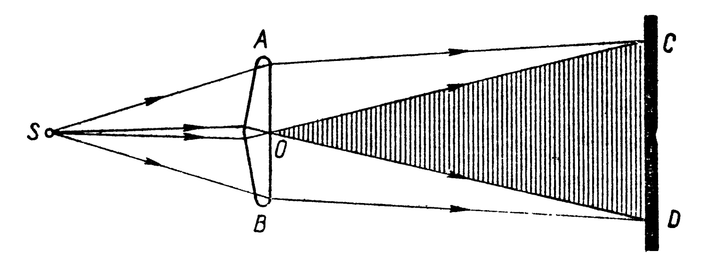


Рис. 18.5

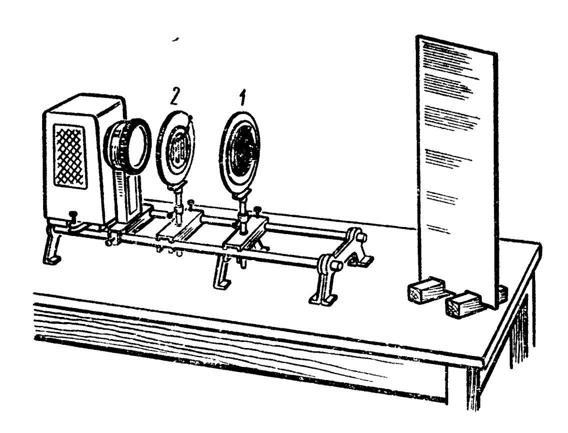


Рис. 18.6

возникает благодаря постоянной разности хода волн, идущих по направлениям лучей *SOD* и *SBD*.

При постановке опыта с бипризмой Френеля (рис. 18.6) [57, ч. 2, опыт 83] надо иметь в виду, что данный весьма выразительный опыт не обеспечивает, однако, достаточной видимости для класса и поэтому при его постановке надо уделить особое внимание следующим моментам:

1. Использовать мощную лампу, желательно ртутно-кварцевую ДРШ-500, или электрическую дугу и возможно ярче осветить щель, сфокусировав на ней конус лучей от конденсора фонаря.

2. Ребро призмы *1* установить строго параллельно щели *2*, ширина которой должна примерно равняться толщине лезвия от безопасной бритвы (0,1—0,05 мм).

3. Использовать экран с ровной плоской поверхностью, например планшет, обтянутый чертежной бумагой.

4. Поставить экран под углом к пучку света и найти такое положение, когда эффект от «растяжения» интерференционной картины не будет еще теряться в результате уменьшения ее яркости.

В принципе четкость интерференционных полос и их число должны увеличиваться при использовании монохроматического света. Однако светофильтры столь значительно уменьшают яркость картины, что при постановке демонстрационного опыта нужно использовать белый свет.

5. ЦВЕТА ТОНКИХ ПЛЕНОК

В тонких пленках интерферирует свет не от точечных источников, как это имеет место в опытах Юнга и Френеля, а обычный рассеянный свет, испускаемый протяженными источниками, например небом. Это обстоятельство, как показывает опыт, вносит определенную трудность в усвоение материала учащимися. Кроме того, остается нередко непонятным и требование малой толщины пленок. Поэтому для учителя опишем материал подробнее, чем это имеет место в учебнике, с тем чтобы он мог при необходимости использовать те или иные моменты в своей работе.

Рассмотрим для определенности сначала один луч a_1 монохроматического пучка света, падающего под углом α на поверхность пленки толщиной 2λ (рис. 18.7, *а*). В точках *А*, *Б*, *В*, *Г*, *Д*, *Е* луч будет частично проходить во вторую среду. Однако отражаться при данных условиях от границы раздела сред будет только незначительная доля света. Так, например, при $\alpha = 30°$ от поверхности стекла отражается всего лишь 4,9% энергии света. Нетрудно подсчитать, что в точке *В* выйдет обратно в воздух примерно 4% энергии. Из сказанного следует, что при дальнейших рассуждениях для отраженного света можно принимать во внимание только лучи a_2', a_1'' и a_1'. Далее можно рассмотреть интерференцию волн по направлению лучей a_1' и a_1''. Однако это всегда вызывает дополнительные вопросы учащихся, поскольку данные лучи на чертеже находятся на некотором расстоянии один от другого [см.: 12, рис. 198]. Поэтому лучше рассмотреть лучи a_2' и a_1''. А для проходящего света достаточно рассмотреть интерференцию той части световых волн a_1 и a_2, которая попадает в точку *Г*.

При вычислении разности хода волн Δ необходимо учесть угол преломления β, показатель преломления среды n и изменение фа-

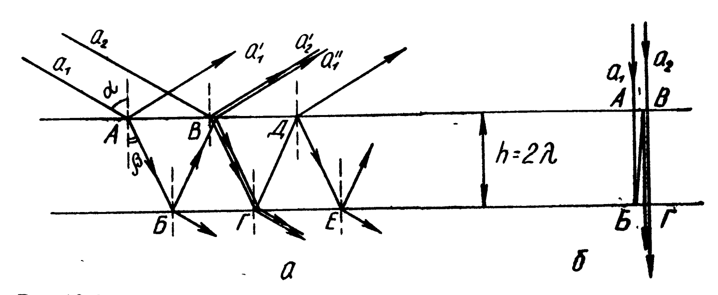


Рис. 18.7

зы вектора $\vec{E}$ при отражении волны. Для отраженного и проходящего света условия максимума света соответственно выражаются формулами: $\Delta_1 = 2hn \cos\beta + \frac{\lambda}{2} = 2m\frac{\lambda}{2}$; $\Delta_2 = 2hn \cos\beta = 2m\frac{\lambda}{2}$ [9, с. 120]. Но в средней школе сначала можно ограничиться частным случаем падения луча монохроматического света перпендикулярно поверхности пленки. Тогда условие максимума для проходящего света будет иметь вид $2h = m\lambda'$, где λ' — длина волны света в пленке. В таком виде данная формула и может быть сообщена учащимся. Далее желательно пояснить, почему интерференция света заметна глазу только в тонких пленках.

Рассмотрим пленку толщиной 2λ. Луч a_1 (рис. 18.7, *б*) проходит в пленке путь, равный 6λ, а луч a_2 — путь, равный 2λ, поэтому $\Delta = 4\lambda$. Тогда следующий максимум будет наблюдаться при условии $\Delta = 5\lambda$.

Но это значит, что максимум света должен наблюдаться под значительно измененным углом α. В результате освещенные участки пленки будут отстоять друг от друга на значительном расстоянии и интерференционные полосы будут хорошо заметны (см. рис. 18.7, *а*). Условия максимума для разных лучей наблюдаются в разных местах пленки, и она оказывается окрашенной.

Аналогичным построением нетрудно показать, что при большей толщине пленки, например при $h = 10\lambda$, изменение угла α (и β) меньше и, следовательно, расстояния между светлыми полосами на пленке также будут меньшими. При некоторой толщине пленки полосы сольются для глаза, образуя поверхность, освещенную всюду одинаково.

Интерференцию света в тонких пленках следует обязательно продемонстрировать учащимся, проецируя в отраженном свете интерференционную картину, которую дает мыльная пленка на вертикальной проволочной рамке [57, ч. 2, опыт 85].

Сведения о цветах тонких пленок применяют затем для объяснения образования колец Ньютона [57, ч. 2, опыт 84].

Для закрепления материала желательно решить задачу об интерференции света в воздушном клине [27, № 876]. Эта задача позволяет дать понятие о том, что с увеличением угла клина α и, следовательно, его толщины в том или ином месте интерференционная картина становится менее отчетливой.

Учащиеся это обнаруживают сами при выполнении лабораторной работы «Наблюдение явления интерференции света». Для наблюдений каждому ученику выдают две стеклянные пластинки [12; 81], с помощью которых и получается интерференция света в воздушном клине. Работа может быть поставлена и как предваряющая перед изучением колец Ньютона.

Практическое применение интерференции поясняют на примерах проверки качества обработки поверхностей и просветления оптики [12, § 87].

6. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

По аналогии с уже известными учащимся опытами по дифракции механических (см. рис. 15.17) и электромагнитных [84, опыт 228] волн ставят опыт по дифракции света. При этом предварительно следует примерно оценить, каковы должны быть, исходя из длины волны, размеры препятствия или щели для уверенного обнаружения данного явления.

В классе следует показать опыты по дифракции света от щели и нити [57, ч. 2, опыты 86 и 87]. В обоих случаях из-за недостаточной видимости явление приходится наблюдать отдельным группам учащихся[1].

При этом, осторожно перемещая экран вдоль направления распространения лучей света, нужно обязательно показать, что в середине дифракционной картины за нитью появляется то светлая, то темная полоска. Для лучшей видимости явления желательно учащимся раздать лупы.

В дополнение к указанным демонстрационным опытам проводится лабораторная работа по наблюдению дифракции света [12; 81]. В классе можно раздать учащимся штангенциркули или микрометры и дать задание: «Наблюдать дифракционную картину, изменяя расстояние между измерительными поверхностями». При зазоре между ножками штангенциркуля в 0,1—0,05 мм наблюдается яркий дифракционный спектр от прямого света электролампы.

Интересные наблюдения дифракции света учащиеся могут выполнить и в домашних условиях [27, гл. 36,3]; в том числе полезно предложить учащимся следующую экспериментальную задачу:

Поставьте на пути яркого света, желательно на пути солнечных лучей, параллельно друг другу два ровных карандаша, и, передвигая их, получайте на плоском экране пучки света разной ширины. Получите как можно более узкий пучок и проведите вдоль него линию. Какой вывод можно сделать о распространении пучков света на основе этого опыта?

а) Сдавливая пальцами сбоку карандаши (рис. 18,8, *а*), добейтесь того, чтобы пучок света стал менее ярким, но более широким. В чем причина такого изменения пучка света?

б) Проделайте опыт, аналогичный предыдущему, но с двумя бритвенными лезвиями (рис. 18.8, *б*), поставив их так, чтобы щель имела форму острого клина. Почему пучок света от того места щели, которое расположено около острия клина, получается более широким и размытым?

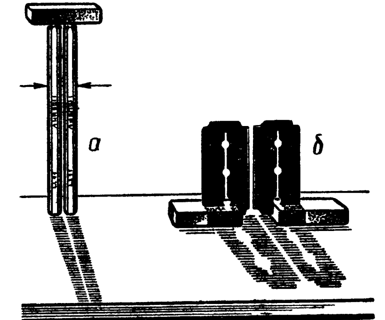


Рис. 18.8

---

[1] Прекрасную видимость для всего класса дают опыты по дифракции с применением луча лазера.

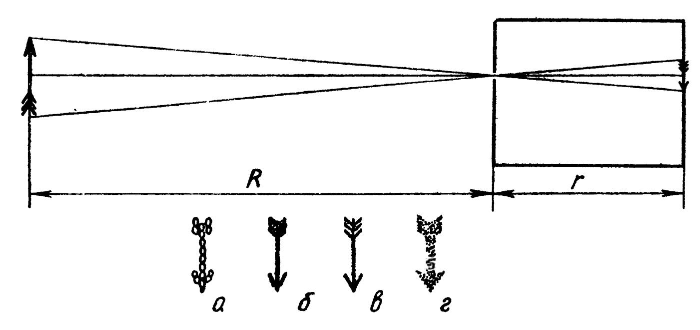


Рис. 18.9

Важность учета дифракции в практике следует показать на примере оптических приборов. С этой целью полезно решить следующую задачу:

На рисунке 18.9 показана схема «дырочной камеры» и вид изображения «стрелки» при размерах отверстия: а) 3 мм; б) 1 мм; в) 0,5 мм; г) 0,03 мм. Как объяснить различие изображений?

Ответ. С уменьшением до известного предела размера отверстия четкость изображения увеличивается. В соответствии с законами геометрической оптики прямолинейные лучи, идущие от каждой точки предмета, проходя отверстие, дают на экране освещенное круглое пятно. Светлые пятна больших размеров грубо очерчивают контуры и детали светящегося предмета, а малых размеров — более точно. Но при очень малом отверстии, соизмеримом с длиной световой волны, резкость изображения уменьшается. Из-за дифракции света изображение светящейся точки получается уже в виде светлого центрального кружка, окруженного чередующимися темными и светлыми кольцами.

Далее желательно пояснить, что дифракционная картина зависит как от размеров отверстия O, так и от расстояний l_1 и l_2 (рис. 18.10).

Дифракционная картина, подобная показанной на рисунке 18.9, получится и от большого отверстия, например диаметром 10—20 см, но только на расстоянии l_2 в несколько километров.

Изображение двух светящихся точек S_1 и S_2 получится в виде

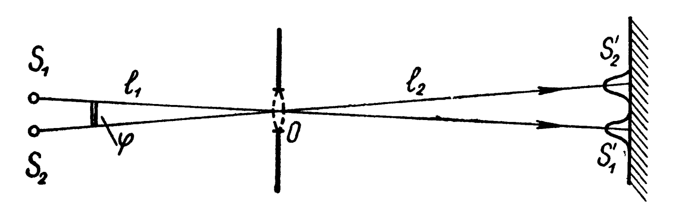


Рис. 18.10

двух светлых кружков, с темными и светлыми кольцами вокруг них. При малом угловом расстоянии φ между точками S_1 и S_2 эти системы могут так налагаться друг на друга, что уже не будут различаться глазом как отдельные.

7. ДИФРАКЦИЯ ОТ ДВУХ ЩЕЛЕЙ. ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЕТКА

При рассмотрении дифракции света от двух щелей принимают их за точечные источники света и выполняют или повторяют построения, подобные тем, какие делали для механических волн. В результате получают условие максимума света $d \sin \varphi = k\lambda$, где d — расстояние между источниками света.

Данные понятия желательно закрепить путем решения следующей экспериментальной задачи:

Из плотной бумаги (хороша черная бумага, применяемая для упаковки фотоматериалов) сделайте два экрана. В одном прорежьте бритвой щель длиной 2—3 см и толщиной 0,5—1 мм, а в другом — две тонкие щели такой же длины на расстоянии 0,1—0,2 мм друг от друга. Осветив бóльшую щель ярким солнечным или электрическим светом, посмотрите на нее через две другие щели. Как объяснить возникновение по бокам щели светлых и темных полос и их цветную окраску? Зарисуйте и объясните порядок чередования цвета в полосах.

Если задачу решают в классе, то экраны с двумя прорезями должны быть заготовлены заранее и розданы учащимся. Ярко освещенную (одну на весь класс) щель можно получить, закрыв черной бумагой с прорезью конденсор проекционного фонаря. Еще лучше воспользоваться лампой с прямой нитью накала.

В связи с решением этой задачи следует обстоятельно рассмотреть особенности дифракционного спектра в сравнении со спектром призматическим. Призма дает один спектр. Две щели дают целый ряд симметрично расположенных относительно центральной полосы спектров (1-го, 2-го и т. д. порядка). Порядок расположения цветов в спектрах противоположный: в призматическом спектре больше всего отклоняются фиолетовые лучи, а в дифракционном — красные.

При демонстрации дифракционной решетки нередко пользуются установкой, в которой за решеткой находится собирающая линза, а в фокальной плоскости последней помещен экран. Применение линзы мотивируют тем, что она «фокусирует» волны, идущие параллельно, в одной точке, в которой и происходит сложение их и взаимное усиление. С методической точки зрения такой прием вряд ли целесообразен. Линза играет второстепенную роль, только улучшая несколько качество спектра, который получается на экране и без нее.

Для определения с помощью дифракционной решетки длины волны света и ее частоты собирают установку, схема которой показана на рисунке 18.11.

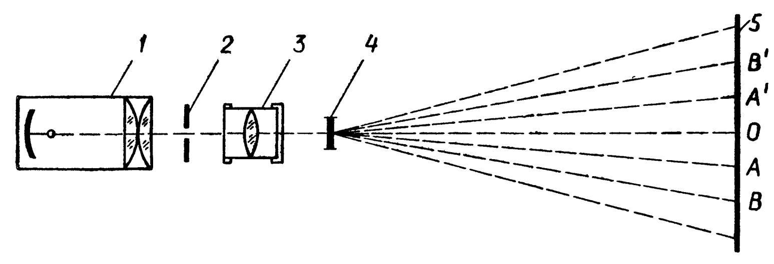


Рис. 18.11

Освещают возможно ярче щель *2* сходящимся пучком света от конденсора фонаря *1* и с помощью объектива *3* получают на экране *5* ее изображение. Затем между экраном и объективом помещают дифракционную решетку *4* и наблюдают на экране *5* интерференционную картину.

Опыт может быть поставлен и с отражательной дифракционной решеткой, в качестве которой можно использовать патефонную пластинку [27, № 875].

В заключение необходимо обратить внимание учащихся на дифракционные явления в природе. Скопления частиц в воздухе (капелек тумана, кристаллов льда и др.) образуют своего рода пространственные дифракционные решетки, обусловливающие, например, появление радужных колец вокруг Луны, фонаря и др. [30; 88].

8. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

Учащиеся уже знают, что естественный свет, с которым мы имеем дело в опытах, представляет собой электромагнитное излучение или совокупность цугов волн, испускаемых миллиардами атомов светящегося тела. Поэтому в световом пучке существуют всевозможные направления векторов $\vec{B}$ и $\vec{E}$, дающих графически картину, напоминающую щетинки ершика для чистки бутылок.

В связи с данными представлениями о пучке естественного света ставят вопрос о возможных способах обнаружения поперечности его колебаний.

Ответ подсказывается аналогией с опытом по обнаружению поперечности волн радиодиапазона (см. рис. 16.14). При этом следует обратить внимание на то, что ширина щелей меньше длины волны.

В этой связи полезно еще раз продемонстрировать опыты с генератором СВЧ, используя самодельные решетки, представляющие собой рамки, на которые намотана проволока, притом таким образом, что ширина щелей оказывается примерно в 10 раз меньше длины волны ($\approx$ 0,1 см).

Очевидно, малость длины волны света требует применения чрез-

вычайно узких щелей. По аналогии можно заключить, что для обнаружения поперечности световых волн нужны «решетки» со щелями порядка 10^{-8} м.

Такие решетки создала сама природа в виде кристаллических тел. Решетка в кристаллах создается правильным чередованием плоскостей, в которых расположены атомы и молекулы. Поскольку размеры атомов имеют порядок 10^{-10} м, а длина волн видимого света 10^{-7} м, то ширина «щелей» в кристаллах оказывается в сотни и тысячи раз меньше длины световой волны, что согласуется с результатами описанного выше опыта.

После этого показывают опыт с поляроидами из набора, который выпускает Главучтехпром. Установка с двумя поляроидами показана на рисунке 18.12 [57, ч. 2, опыт 91]. К поляроидам прикрепляют стрелки-указатели, показывающие направление плоскостей поляризации света. Для защиты поляроида от перегрева свыше 60 °С между конденсором и первым поляроидом устанавливают теплопоглощающий фильтр (кювету с водой). Сначала на экране наблюдают освещенное пятно, а затем постепенное уменьшение его освещенности вплоть до минимальной при скрещенных поляроидах. Таким образом, демонстрация поляризации света и ее объяснение по аналогии с поляризацией волн радиодиапазона не представляет особой трудности и хорошо усваивается учащимися на данном уровне.

Поляризация света не редкое явление природы, а скорее правило. Свет поляризуется при отражении и преломлении, при рассеянии в мутных средах и т. д. Поляризацию света можно обнаружить, рассматривая свет, испускаемый раскаленными телами, рассеянный свет неба и т. д. Практическое применение поляризации света поясняют на примере устройства сахариметра, в котором используется явление вращения плоскости поляризации, и на при-

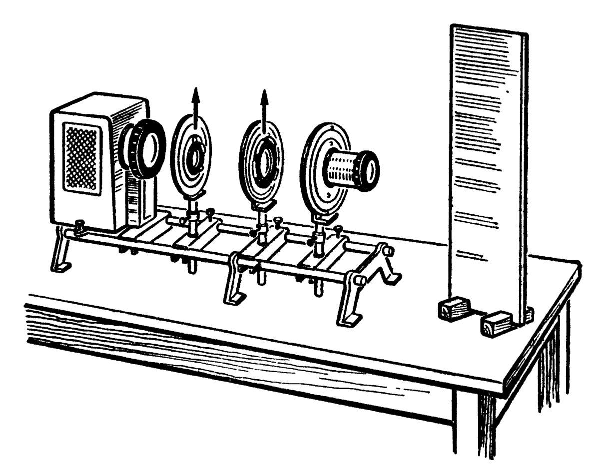


Рис. 18.12

мере исследования деформаций с помощью прозрачных моделей технических деталей [57, ч. 2, опыт 95].

Заключительный урок посвящается повторению и обобщению материала об электромагнитных, в том числе световых, волнах.

Основные сведения из истории становления и развития волновой и корпускулярной теории света приведены в пособии [68, с. 167]. При этом необходимо кратко рассказать о работах Лебедева по световому давлению [68, с. 166]. Данной теме может быть посвящен физический вечер.

ГЛАВА 19

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Программой предусматривается изучение раздела «Основы теории относительности» в X классе. Включение его в школьный курс является важным шагом на пути его приближения к идеям современной науки.

Однако специальная теория относительности (в дальнейшем — СТО) — это не просто «еще один раздел» школьной программы. СТО — общефизическая теория, затрагивающая важнейшие понятия всего здания физической науки.

Для усвоения СТО необходима пропедевтическая подготовка учащихся на протяжении всего курса физики. Упор должен быть сделан не на парадоксальность выводов СТО, а на их естественность, логичность и неизбежность. Учащиеся должны понять те положения, на которых основываются классические пространственно-временные (и другие, с ними связанные) понятия, а также границы их применимости. Пропедевтический релятивистский подход в преподавании физики вырабатывает у учащихся предпосылки против догматизма, схоластики, предвзятости в изучении природы и естественным образом подводит их к релятивистским выводам. Размышления учащихся над привычными понятиями (особенно такими фундаментальными, как пространственно-временные понятия, понятия движения, массы, импульса, энергии, электромагнитного поля и др.) в духе, введенном в науку СТО, даже без рассмотрения самих релятивистских положений, необычайно плодотворны; они значительно углубляют понимание всей физики. Изучая СТО, школьники убеждаются в том, что классическая механика Ньютона не противостоит механике Эйнштейна, с логической необходимостью сливается с ней. Методические аспекты преподавания механики, электродинамики, оптики, намечающие пути подготовки учащихся к восприятию идей специальной теории относительности, изложены в работе [73], к которой мы отсылаем читателя.

Поурочный план изучения СТО может быть таким:

1-й урок. Принцип относительности Эйнштейна.

2-й урок. Принцип постоянства скорости света.

3-й урок. Релятивистский закон сложения скоростей.
4-й урок. Импульс и масса в СТО. Релятивистский закон динамики.
5-й урок. Закон взаимосвязи массы и энергии.

1. ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ЭЙНШТЕЙНА

Переходу к новому разделу — «Основы теории относительности» — предшествует повторение классического принципа относительности Галилея — Ньютона. При этом подчеркивают, что он относится к *механическим* явлениям. Возникает вопрос: справедлив ли принцип относительности для других, немеханических явлений: оптических, электромагнитных и других?

Здесь полезно привести примеры формул, из которых было бы ясно, что не только законы механики, но и законы электродинамики подразумевают задание системы отсчета (СО). Такими примерами могут быть формулы: $I = en\ |\vec{v}|S$ (сила тока в электронной теории); $|\vec{F}| = q\ |\vec{v}| \cdot |\vec{B}| \sin\alpha$ (сила Лоренца, действующая на заряд q, движущийся со скоростью $\vec{v}$ в магнитном поле). В эти формулы входит скорость $\vec{v}$ движения заряженной частицы, которая без указания системы отсчета не имеет смысла.

Все эти примеры и делают актуальной для учащихся проблему выполнимости принципа относительности в области электромагнитных явлений.

Учащимся сообщают, что были поставлены многочисленные опыты с целью обнаружения влияния равномерного движения лаборатории на ход электромагнитных (в частности, оптических) явлений. Все они дали отрицательный ответ: *по электромагнитным явлениям, как и по механическим, нельзя определить, находится ли лаборатория в состоянии относительного покоя или равномерного прямолинейного движения.*

Одним из наиболее точных и чувствительных экспериментов является оптический опыт Майкельсона и Морли. Идея опыта и схема установки изложены в учебнике [12]. При его объяснении полезна кинематическая модель, описанная в книге [73]. Поскольку расчеты по опыту Майкельсона программой не предусмотрены, можно ограничиться лишь качественной стороной эксперимента. Нецелесообразно также при его изложении исходить из идеи эфира и понятия эфирного ветра. С современной точки зрения опыт Майкельсона — Морли (и другие подобные эксперименты) доказывает, что электромагнитные явления (и, в частности, оптические) «нечувствительны» к равномерному перемещению лаборатории.

Для усвоения сущности принципа относительности полезен разбор следующих вопросов:

1. Чем отличается принцип относительности Эйнштейна от принципа относительности Галилея?

2. Почему для проверки принципа относительности делались попытки обнаружить влияние орбитального движения Земли на лабораторный опыт?

3. Водитель автомобиля, находясь в кабине, определяет по спидометру, имеющемуся на приборном щитке, скорость машины и пройденное расстояние. Не противоречит ли это принципу относительности?

Ответ. Не противоречит. Хотя водитель и определяет скорость, глядя на «внутренний» прибор автомобиля, а не ориентируясь на внешние предметы, все же показания спидометра соответствуют действительности при условии, что нет скольжения колес относительно дороги. При пробуксовке же колес показания спидометра не соответствуют действительности. Следовательно, в конечном счете измерение скорости и расстояния спидометром базируется на взаимодействии колес и дороги.

2. ПОСТУЛАТ ПОСТОЯНСТВА СКОРОСТИ СВЕТА В ВАКУУМЕ

В этой теме учащиеся впервые непосредственно подводятся к новым представлениям о пространстве и времени.

Можно подойти к постановке проблемы на уроке исторически. Опыты Майкельсона (1881) и другие свидетельствовали о справедливости принципа относительности в оптике и электродинамике. Принцип же относительности был провозглашен лишь в работе Эйнштейна, опубликованной в 1905 г. Почему же, несмотря на убедительные опытные факты, физики не спешили объяснить их столь же просто и ясно, как это сделал Галилей для механических явлений, сформулировав принцип относительности? Дело в том, что признание принципа относительности в оптике (и вообще в электродинамике) сопряжено с тем, что приходится отказаться от привычных представлений о пространстве и времени, а также от других, твердо установленных и подтвержденных механикой законов и понятий. Прежде всего это относится к закону *сложения скоростей*. Важнейшим выводом электродинамики является утверждение о том, что скорость c электромагнитных волн (в том числе и световых) равна в вакууме $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Экспериментально этот вывод блестяще подтвердился. Возникает вопрос: в какой системе отсчета скорость света равна c?

Теория Эйнштейна постулирует инвариантность скорости света в вакууме во всех инерциальных системах отсчета. Это положение является наряду с принципом относительности основным в теории относительности и часто называется «постулатом постоянства скорости света в вакууме».

Уже после создания теории относительности были получены экспериментальные обоснования данного постулата теории. В осведомительном плане можно рассказать о некоторых опытах и наблю-

дениях. Одно из первых доказательств независимости скорости света от скорости источника (а следовательно, и от системы отсчета) было получено при наблюдении двойных звезд (де Ситтер, 1913 [73]). Важно обсудить с учащимися следующие моменты:

1) Принцип постоянства скорости света относится к вакууму. Легко понять, что если бы распространение света было обусловлено некоей средой («эфиром»), то одинаковость скорости независимо от инерциальной системы отсчета (ИСО) была бы невозможной. Можно привести аналогию со звуком в воздухе: скорость звука определяется свойствами газа (давлением, плотностью) и не зависит от того, движется источник или покоится. Это — общее свойство волн. Однако независимость скорости звука от движения источника еще не означает, что во всех ИСО скорость звука одинакова. Если ИСО движутся относительно среды (воздуха), в которой распространяется звук, то скорость звука будет различна в разных ИСО.

Следовательно, принцип постоянства скорости света в вакууме отвергает эфир. Для распространения света не требуется никакой среды. Естественно, скорость света в какой-либо среде различна в разных ИСО.

2) Принцип постоянства c касается только *модуля* скорости, но не *направления* распространения. Это можно разъяснить с помощью аналогии с каплями дождя в безветренную погоду. Относительно неподвижных предметов капли падают вертикально вниз. На окнах домов остаются вертикальные следы. На окнах же движущихся вагонов — косые следы. Аналогичное явление наблюдается и со светом.

3) Необходимо подчеркнуть особую роль понятия «скорость света в вакууме (c)» во всей теории относительности. Из обоих постулатов теории относительности можно заключить, что c — это *предельно большая из возможных в природе скоростей распространения сигналов* (взаимодействий). Действительно, к скорости света в вакууме не прибавляется переносная скорость инерциальной системы отсчета.

Для закрепления знаний можно предложить учащимся следующие вопросы:

1. Согласно электродинамике скорость света в вакууме равна c. Для какой системы отсчета это верно?

2. Почему не существует «принципа постоянства скорости звука?» В чем отличие звука от света в этом смысле?

3. Исходя из постулатов теории относительности, обоснуйте ненужность гипотезы эфира.

4. Обоснуйте предельный характер скорости света, исходя из постулатов СТО.

3. РЕЛЯТИВИСТСКИЙ ЗАКОН СЛОЖЕНИЯ СКОРОСТЕЙ

Релятивистская формула сложения скоростей для одномерного случая

$$v_2 = \frac{v_1 + v}{1 + \frac{v_1 v}{c^2}}, \qquad (1)$$

где v_2 и v_1 — скорости данного тела соответственно в системах отсчета K и K_1, v — скорость системы отсчета K_1 относительно системы отсчета K, приводится без вывода.

Применяя формулу (1), нужно учесть, что в ней речь идет о преобразовании продольной скорости при переходе от одной СО к другой. Скорость v_2 измерена аппаратурой второй СО (K_1), скорости же v_1 и v — аппаратурой первой СО (K). Следовательно, речь идет о сопоставлении результатов пространственно-временных измерений в двух СО.

Отсюда ясно, что формулу (1) нельзя применять, если речь идет об измерении относительных скоростей двух тел в одной и той же СО. Рассмотрим в качестве примера такую задачу:

Две частицы движутся относительно лаборатории со скоростями $v_{1л} = 0,8\ c$ и $v_{2л} = 0,9\ c$ вдоль одной прямой навстречу друг другу. Какова скорость их сближения в лабораторной системе отсчета?

Скорости $v_{1л}$ и $v_{2л}$ здесь определены в одной и той же системе отсчета лаборатории, следовательно по лабораторной системе часов и по лабораторной координатной сетке. Поэтому можно применять классическую формулу сложения скоростей:

$$v_л = v_{1л} + v_{2л} = 1,7\ c.$$

Пример показывает, что в СТО могут быть скорости, превышающие c. Но это не будут скорости передачи сигнала (действия) от одного тела к другому. Относительно лаборатории частицы движутся со скоростями, меньшими c.

Для определения же скорости одной частицы относительно другой надо применить формулу (1). В самом деле, в этом случае мы должны рассмотреть скорость одной частицы (например, второй) в системе отсчета, связанной с первой частицей (система отсчета K_1), следовательно, нам задана скорость второй частицы относительно лаборатории $v_{2л}$ и скорость системы отсчета K_1 относительно лаборатории. Надо найти v (т. е. скорость второй частицы относительно первой). Тогда

$$v = \frac{v_{2л} + v_{1л}}{1 + \frac{v_{2л} v_{1л}}{c^2}} \approx 0,99\ c.$$

Следовательно, вторая частица переносит сигнал к первой частице со скоростью, меньшей c, в полном соответствии с прин-

ципами СТО. Из этого примера видно, что при сложении скоростей по формуле (1) получается скорость, меньшая предельной.

4. ИМПУЛЬС И МАССА В СТО. РЕЛЯТИВИСТСКИЙ ЗАКОН ДИНАМИКИ

После повторения закона динамики Ньютона в форме

$$\vec{F} = \frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t}, \qquad (2)$$

где

$$\vec{p} = m_0\vec{v} \qquad (3)$$

(причем m_0 — масса тела в классическом смысле, т. е. не зависящая от состояния движения величина), учащихся подводят к проблеме: справедлив ли закон (2) и в релятивистских областях движения (т. е. при больших скоростях)? По-видимому, уравнение (2) не выполняется в этом случае, если определять импульс по формуле (3).

В самом деле, из формул (2) и (3) получаем:

$$\vec{F}\Delta t = \Delta\vec{p} = m_0\Delta\vec{v}.$$

Следовательно, с помощью постоянно действующей силы $\vec{F}$ за достаточно длительный промежуток времени Δt можно было бы неограниченно изменять скорость тела. Но это противоречит существованию предельной скорости c.

Интуитивно напрашивается вывод, что причина этого — увеличивающаяся масса m тела, определяющая его инерционные свойства. Теория относительности обосновывает справедливость этого предположения и дает новое определение импульса и массы:

$$\vec{p} = \frac{m_0\vec{v}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}; \quad m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}. \qquad (4)$$

Желательно в качестве повторения понятий импульса и массы рассмотреть следующую простую задачу классической механики, с помощью которой можно лучше уяснить идею получения формул (3) и (4):

Опытным путем сравнивают массы двух тележек, находящихся на длинной платформе, которая движется относительно класса со скоростью $\vec{v}_{пл}$. Опыт ставят с помощью пружины, расталкивающей тележки. Пусть вначале тележки покоятся, а затем, после срабатывания пружины, приобретают противоположно направленные скорости $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$. Тогда, по определению, $\frac{m_1}{m_2} = \frac{|\vec{v}_2|}{|\vec{v}_1|}$. Каково отношение масс тележек в системе отсчета «Класс»?

Расчеты покажут, что отношение масс двух тележек оказывается одинаковым в обеих системах отсчета, в то время как отношение модулей скоростей различно в разных ИСО. Таким образом, инвариантность массы является следствием закона сохранения импульса и классического закона сложения скоростей.

На примере этой задачи понятно, как в принципе может быть построена релятивистская динамика: необходимо так определить импульс (и массу), чтобы закон сохранения импульса выполнялся во всех ИСО, а пересчет скоростей производился бы по релятивистским формулам сложения скоростей. Так в СТО обосновывается иная зависимость импульса от скорости тела:

$$\vec{p} = \frac{m_0\vec{v}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}. \qquad (5)$$

Здесь под m_0 подразумевается масса тела при $v \ll c$ («масса покоя»).

Сравнивая выражение (5) с классическим определением импульса (3), имеем:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \qquad (6)$$

(m — релятивистская масса).

В СТО доказывается, что инвариантный закон динамики имеет такой же вид, что и второй закон Ньютона:

$$\vec{F} = \frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t}, \qquad (7)$$

однако здесь под $\vec{p}$ подразумевается релятивистский импульс (5). При $v \ll c$ релятивистский импульс и релятивистское уравнение динамики переходят в классические.

Рассматривая релятивистский закон динамики, следует обратить внимание на то, что СТО описывает не только равномерное движение тел, но и движение с ускорением. Требование равномерности движения относится исключительно лишь к движению систем отсчета относительно друг друга.

Примером применения релятивистской динамики является расчет работы синхрофазотрона [12].

5. ЗАКОН ВЗАИМОСВЯЗИ МАССЫ И ЭНЕРГИИ

Этот закон, по выражению Эйнштейна,— «наиболее важный результат специальной теории относительности»[1]. Не ставя целью строгое обоснование закона, в школьном курсе физики необходимо все же на простых и убедительных примерах показать его справед-

[1] Эйнштейн А. Собрание научных трудов. М., 1965. т. I. с. 679.

ливость. Одним из таких примеров является расчет кинетической энергии тела. При увеличении скорости тела, как известно, растет его кинетическая энергия и вместе с тем увеличивается и масса. Какова связь между ΔE и Δm?

Проще всего это установить для частного случая $v \ll c$, когда выводы СТО совпадают с классическими [12, с. 208]:

$$mc^2 - m_0c^2 = \frac{1}{2} m_0v^2.$$

В СТО обосновывается, что кинетическая энергия при любых скоростях равна разности:

$$mc^2 - m_0c^2 = \Delta mc^2.$$

Это и есть частный случай выражения закона Эйнштейна о пропорциональности массы и энергии. Закон Эйнштейна $E = mc^2$ справедлив для любого вида энергии.

Особое внимание следует уделить формированию понятия энергии покоя. Соответствующая методика изложена в работе [73, с. 102].

При изучении данной темы необходимо уделить внимание методологическим вопросам. Современная разновидность идеалистического «энергетизма» взяла на вооружение и закон пропорциональности массы и энергии. В зарубежной философской, научной и популярной литературе этот закон часто трактуют как закон «эквивалентности» массы и энергии, якобы утверждающий превращаемость массы в энергию и наоборот. Массу же объявляют мерой «количества материи». И вот уже «вывод»: материя и энергия тождественны, могут превращаться друг в друга.

Нужно разъяснить учащимся, что ни одно физическое явление не дает повода для подобных выводов. Во всех явлениях соблюдается закон сохранения и релятивистской массы, и энергии. Сущность закона Эйнштейна состоит в том, что при всяком увеличении (или уменьшении) энергии на ΔE масса тела также соответственно увеличивается (или уменьшается) на $\frac{\Delta E}{c^2}$. Так что ни о каком «превращении» массы в энергию или энергии в массу речи быть не может.

6. ОБОБЩАЮЩЕЕ ПОВТОРЕНИЕ СТО

Оно призвано создать у учащихся целостное представление о значении СТО в физической картине мира. Путем сопоставления классической механики и СТО они окончательно убеждаются в единстве научного миропонимания: классическая физика — мир медленных движений ($v \ll c$); СТО — мир релятивистских скоростей; в предельном случае выводы СТО совпадают с классическими. Основная идея урока: подчеркнуть познаваемость законов движения материи на различных уровнях познания (уровни малых и больших скоростей), выделить элементы *абсолютности* наших

знаний, особо подчеркнуть *объективность* наших знаний о пространстве и времени и их опытное происхождение.

Данное обобщение целесообразно провести в форме семинара, который может быть проведен по следующему плану:

1. Сущность принципа относительности и примеры его проявления.
2. Исследование движения материи — путь раскрытия свойств пространства и времени.
3. Содержание понятия «скорость света» в СТО.
4. Механика релятивистских скоростей.

В заключение семинара полезно заполнить таблицу (см. табл. 19.1).

Таблица 19.1

Принципы, законы, величины	Медленные движения (классическая механика)	Быстрые движения (релятивистская механика)
Принцип относительности	Справедлив для механических явлений	Справедлив для всех явлений
Закон сохранения энергии	Справедлив	Справедлив
Закон сохранения импульса	Справедлив в виде $\vec{p} = m_0\vec{v}$	Справедлив в виде $\vec{p} = \dfrac{m_0\vec{v}}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}}$
Закон динамики	Второй закон Ньютона	Закон динамики Эйнштейна
Скорость	Не ограничена	c — предельная скорость
Сила	Абсолютна (механическая)	Все силы относительны
Масса	Абсолютна; равна массе покоя	Относительна; масса покоя минимальна
Энергия	Отсутствует единая формула для всех видов энергии	Есть единая формула для всех видов энергии: $E = mc^2$

Делается обобщающий вывод: СТО утверждает одинаковость законов физики для всех ИСО. Выводы релятивистской физики совпадают с классическими выводами в предельном случае малых скоростей.

Желательно заслушать на семинаре несколько сообщений учащихся. Тематика может быть следующей:

1. История открытия принципа относительности.
2. Жизнь и творчество создателя теории относительности А. Эйнштейна[1].
3. СТО в современной технике.

На данном занятии целесообразно продемонстрировать учебный кинофильм «Что такое теория относительности».

[1] См.: Кузнецов Б. Г. Эйнштейн. М., 1972; Зелиг К. Альберт Эйнштейн. М., 1964.

ГЛАВА 20

ИЗЛУЧЕНИЕ И СПЕКТРЫ

В данной теме решаются две крупные познавательные проблемы

1) обосновывается электромагнитная природа различных излучений;

2) экспериментально устанавливается взаимосвязь между характером излучения и структурой вещества.

Спектры излучения, на наш взгляд, предпочтительнее изучать на основе знаний квантовой оптики и строения атома. При рассмотрении темы до квантовой оптики следует широко использовать знания учащихся о строении атома, полученные в курсе химии. В этом случае появится возможность некоторого теоретического истолкования опытных фактов, что сделает изучение темы более проблемным и логичным. При изучении строения атома высказанные гипотезы приобретут форму теоретических обобщений.

Поурочное планирование темы может быть следующим:

1-й урок.	Распределение энергии в спектре.
2-й урок.	Непрерывный и линейчатый спектры.
3-й урок.	Спектральный анализ.
4-й урок.	Инфракрасные и ультрафиолетовые лучи.
5-й урок.	Рентгеновские лучи.
6-й и 7-й уроки.	Шкала электромагнитных волн. Обзорное повторение электромагнитных излучений.

1. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ В СПЕКТРЕ

Во введении к теме повторяем сделанный ранее вывод об электромагнитной природе света, об отсутствии особой светоносной среды — эфира, о том, что электромагнитные волны сами представляют собой особый вид материи. Но, как и радиоволны, световое излучение рождается в веществе и, поглощаясь, исчезает в веществе. Можно ожидать, что характер светового излучения, как и излучения радиоволн, зависит от *излучающей системы*. Радиоволны порождаются в колебательных контурах. Более коротковолновое оптическое излучение порождается атомами, молекулами и их совокупностями.

В соответствии с электродинамикой электромагнитные волны возникают при ускоренном движении электрических зарядов (гл. 18, 1). Чтобы система, содержащая заряженные частицы, излучала электромагнитные волны, необходимо предварительно сообщить ей добавочную энергию (возбудить ее).

Далее рассматривают особенности теплового излучения. Демонстрируют излучение руки, нагретой спирали электроплитки, лампы накаливания, пламени спиртовки. Обращают внимание на то, что характер теплового излучения зависит от температуры. Это можно показать, изменяя силу тока в электроплитке. Излучение

электроплитки можно обнаружить и тогда, когда ее накал столь мал, что видимого излучения вообще не происходит. Так учащихся подводят к идее установления связи между составом излучения и температурой. Приводят экспериментально установленное распределение энергии в спектре теплового излучения [12, рис. 230, 232].

Обращают внимание на наличие максимума на графике. При нагревании тела максимум смещается в сторону бо́льших частот. При температуре 6000 °C (температура поверхности Солнца) максимум излучения приходится на видимую часть спектра. Невысокая экономичность ламп накаливания объясняется низкой (по сравнению с Солнцем) температурой нити накала.

Рассматривая кривую распределения энергии в спектре, можно обратить внимание на ее сходство с распределением молекул по энергиям теплового движения. Эта аналогия наталкивает на гипотезу о том, что энергия излучения поглощается и излучается молекулами только в виде целых порций. Разумеется, подобная аналогия может быть приведена лишь в осведомительном плане, со ссылкой на подробное обоснование в последующих разделах курса физики.

В заключение темы кратко останавливаются на понятии *теплового равновесия* и роли в его установлении теплового излучения. Учащимся известно, что с помощью теплового излучения тела обмениваются энергией. В замкнутой системе тел благодаря этому выравнивается температура всех тел, наступает тепловое равновесие. Это означает, что каждое тело системы излучает столько энергии, сколько поглощает. Следовательно, тепловое излучение равновесно. Это — его отличительная особенность. Тепловое равновесие наступает независимо от того, в каком агрегатном состоянии находятся тела и из какого материала они сделаны.

2. НЕПРЕРЫВНЫЙ И ЛИНЕЙЧАТЫЙ СПЕКТРЫ. СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

К постановке проблемы перед учащимися можно подойти так. Оптическое излучение зарождается в веществе и должно, по-видимому, нести определенную информацию об излучателе. Некоторыми сведениями учащиеся уже обладают: по кривой распределения энергии в спектре можно судить о температуре тела. О чем еще может поведать свет?

Можно предположить, что световое излучение должно зависеть от структуры тела и от его состава. В самом деле, из курса химии известно, что структура электронных оболочек атомов зависит от сорта атомов и от их химических связей.

Постановка опытов подтверждает высказанную гипотезу. Прежде всего учащиеся убеждаются в том, что характер спектра зависит от агрегатного состояния вещества: твердые и жидкие тела испускают свет со сплошным спектром, а газы — с линейчатым. Наблюдая спектр свечения различных атомов, можно заключить, что

существует зависимость набора линий от рода излучающих атомов. На этом основан спектральный анализ.

Далее переходят к рассмотрению спектров поглощения. Всякая колебательная электрическая система может не только излучать, но и поглощать волны. При этом выполняется известная учащимся закономерность, установленная при изучении колебательного контура: частота принимаемых волн равна частоте испускаемых волн. Демонстрация спектра поглощения [57, ч. 2, опыт 100] доказывает правильность высказанной гипотезы[1].

Если источником излучения являются не атомы, а молекулы, то спектры усложняются. Дело в том, что молекулы представляют собой более сложную колебательную систему, нежели атомы. В них могут возникать колебания не только в системе «электрон — ядро», но и в системе «атом (ион) — атом (ион)». Это обусловливает возникновение полосатого спектра. По своей сложности (структуре) полосатые спектры занимают промежуточное положение между линейчатыми и сплошными спектрами, в полном соответствии с тем, что структура молекул по своей сложности также промежуточна между структурой атомов и твердых (жидких) тел.

3. ИНФРАКРАСНЫЕ И УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫЕ ЛУЧИ

Первоначальное представление о существовании инфракрасных и ультрафиолетовых лучей учащиеся уже имеют (см. рис. 14.1, 18.4). Поэтому задача данного раздела — более обстоятельно ознакомить учащихся с их свойствами.

Инфракрасные лучи открыты впервые в 1800 г. английским астрономом Гершелем с помощью чувствительного термометра, помещенного за красным краем спектра Солнца. За фиолетовым участком спектра также было обнаружено невидимое излучение — ультрафиолетовое. Его открыли независимо друг от друга немецкий ученый Риттер и английский ученый Волластон в 1801 г. по химическому действию на хлористое серебро.

В настоящее время разработан целый ряд выразительных демонстраций для обнаружения и изучения свойств инфракрасных и ультрафиолетовых лучей [57, ч. 2, опыты 104—108][2].

Источником инфракрасных лучей может быть лампа накаливания, а приемником — сернистосеребряный фотоэлемент ФЭСС-У10 [57, ч. 2, опыт 104].

Важно показать, что инфракрасное излучение существует и тогда, когда нет видимого. Так, все тела при любой (отличной от абсолютного нуля) температуре излучают инфракрасные («тепловые») лучи. Мощное ультрафиолетовое излучение дает электричес-

---

[1] Интересная демонстрация спектра поглощения газа предложена В. Ф. Радковым (см.: Физика в школе, 1976, № 1, с. 78).

[2] Опыты с инфракрасными лучами описаны также в журнале «Физика в школе» (1976, № 2).

кая дуга или ртутно-кварцевая лампа ПРК-4. Лучи обнаруживают с помощью специального экрана [57, ч. 2, опыт 108].

Учащимся показывают отражение и преломление инфракрасных лучей [57, ч. 2, опыт 106]. Желательна также интересная демонстрация сигнализации инфракрасными лучами [57, ч. 2, опыт 107].

Ультрафиолетовые лучи, как и инфракрасные, обнаруживаются не только на «краях» сплошного спектра, но и в случае линейчатого спектра. Так, в спектре водорода обнаружены и инфракрасные, и ультрафиолетовые линии.

Учебный фильм «Невидимые лучи» иллюстрирует основные свойства и применение инфракрасных и ультрафиолетовых излучений.

4. РЕНТГЕНОВСКИЕ ЛУЧИ

Существует два различных вида рентгеновского излучения: тормозное и характеристическое. Возникновение тормозного излучения объясняют на основе представлений электродинамики: при торможении электронов в веществе возникает электромагнитное излучение со сплошным спектром. При этом всегда имеется четко выраженная коротковолновая граница спектра, определяемая соотношением $eU = h\nu_{max}$, где U — ускоряющее напряжение. Разумеется, эта формула может быть объяснена лишь в квантовой оптике. Увеличение энергии электронов дает возможность уменьшать длину волны и увеличивать проникающую способность излучения. Напряжение в различных рентгеновских установках варьируется в широких пределах (от десятков вольт до 10^8 В). Возможность управлять длиной волны излучения с помощью изменения электрических параметров опыта является одним из убедительных аргументов в обосновании электромагнитной природы рентгеновского излучения.

Механизм возникновения характеристического излучения сходен с испусканием атомами линейчатого излучения и связан с переходом атомов с верхних уровней энергии на нижние. Спектр характеристического излучения линейчатый. Замечательно, что линейчатый характер спектра получается от вещества, находящегося в твердом состоянии, чего не может быть в случае оптического излучения. Причиной этого различия является то, что рентгеновский спектр порождается переходами электронов внутренних слоев атомов. Внутренние слои атомов не изменяются при изменении агрегатного состояния вещества и химических связей атомов. Благодаря этому возможно с помощью характеристического рентгеновского излучения определять состав минералов и других твердых тел.

Большая проникающая способность рентгеновского излучения — его самое замечательное свойство. Оно может быть объяснено большой энергией рентгеновских квантов.

Особое внимание необходимо уделить разбору доказательства волновой природы рентгеновских лучей, опытам Лауэ по дифракции рентгеновских лучей в кристаллах.

Источниками рентгеновского излучения являются не только специальные (рентгеновские) трубки. В качестве источника рентгеновского излучения применяется бетатрон — индукционный ускоритель электронов. Некоторые радиоактивные элементы испускают характеристическое рентгеновское излучение.

Интерес учащихся вызывает сопоставление истории открытия невидимых излучений. Инфракрасное и ультрафиолетовое излучения были впервые обнаружены в спектре Солнца, а затем были найдены лабораторные источники этих излучений. С рентгеновским излучением случилось обратное: оно впервые открыто в лабораторных опытах. Однако современная астрофизика обнаружила мощные рентгеновские излучения космических объектов, например солнечной короны. С Солнцем связано и другое рентгеновское излучение — излучение ближайших к Солнцу планет и Луны. В годы повышенной активности Солнце выбрасывает потоки заряженных частиц (главным образом протонов), которые и вызывают рентгеновское излучение планет.

По этой теме рекомендуем провести экскурсию в рентгеновский кабинет медицинского учреждения, в рентгеноструктурную лабораторию завода или института. Желателен также просмотр учебного кинофильма «Рентгеновские лучи».

5. ШКАЛА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Это не просто наглядная и удобная таблица, как склонны представлять себе учащиеся. Подобно тому как в таблице элементов Д. И. Менделеева в сконцентрированном виде выражены знания об атомах, так и в шкале электромагнитных волн синтезированы знания об излучении. По сути, оба обобщения — таблица Д. И. Менделеева и шкала электромагнитных волн — являются сгустками наших знаний о двух видах материи — веществе и поле.

Данная тема должна носить характер итогового обобщения изученных излучений. Окончательный вывод об их единой электромагнитной природе должен быть обоснован путем сопоставления свойств волн различных диапазонов.

Оправдало себя проведение по данной теме двухчасового занятия в форме семинара. Учащимся предлагают подготовить по каждому виду излучения (по каждому диапазону волн) следующие сообщения:

1. Способы генерирования.
2. Способы регистрации.
3. Методы исследования спектра.
4. Основные характеристики и свойства (диапазон частот, физические свойства).
5. Практическое применение. (Интересные примеры применения различных видов излучений в сельском хозяйстве приведены в книге [78, с. 146].)

Кроме того, ряду учащихся поручают подготовить сообщения по следующим вопросам:

1. Работы П. Н. Лебедева по изучению электромагнитных излучений (миллиметровые волны; давление света) [21, т. 3].
2. Опыты А. А. Глагольевой-Аркадьевой [21, т. 3].
3. Изучение космоса с помощью радио-, рентгеновского и гамма-излучений[1].
4. «Светящийся электрон» [93, с. 221].
5. Свечение Вавилова — Черенкова [93, с. 60].
6. Глаз и Солнце[2].
7. Цвета тел [71].

При обсуждении доказательств электромагнитной природы света излучений необходимо опираться на следующие факты: 1) Существуют такие участки спектра излучений, электромагнитная природа которых убедительно выступает из условий их возникновения. Сюда относятся радиоизлучение колебательного контура и тормозное рентгеновское излучение. 2) На «стыках» диапазонов излучения могут быть получены *разными* методами. При перекрытии длин волн получаются идентичные по свойствам излучения (например, инфракрасные оптические лучи и субмиллиметровые радиоволны Лебедева и Глагольевой-Аркадьевой [21]). Из этого можно заключить, что инфракрасное излучение имеет электромагнитную природу. 3) Современная наука и техника дают новые доказательства электромагнитной природы света: излучение Вавилова — Черенкова, вызванное движением быстрых электронов в веществе; явление, получившее название «Светящийся электрон» (излучение видимого света электронами в бетатроне); перекрытие генерируемых лазерами различных диапазонов излучений[3] (начиная от радиодиапазона и кончая коротковолновым оптическим излучением); обнаружение космических объектов, излучающих, наряду с оптическим, также и радио-, рентгеновское и гамма-излучения. 4) Экспериментальное доказательство многочисленных следствий и предсказаний электромагнитной теории дисперсии, поглощения, рассеивания, генерирования и других явлений не оставляет никаких сомнений в справедливости вывода об электромагнитной природе рассматриваемых излучений. 5) Общность природы рассматриваемых излучений выражается и в установленном теорией относительности предельном характере их скорости в вакууме, что несовместимо с гипотезой светоносной среды (эфира).

Свет, как и другие разновидности электромагнитных волн, является особым видом материи. Различие частот приводит к различию их свойств при единой электромагнитной природе.

ГЛАВА 21

СВЕТОВЫЕ КВАНТЫ. ДЕЙСТВИЯ СВЕТА

Центральной методической задачей темы является формирование у учащихся понятия о дискретном характере излучения и по-

[1] См.: Климишин А. Астрономия наших дней. М., 1976.

[2] См.: Вавилов С. И. Глаз и Солнце. О «теплом» и «холодном» свете. М., 1961.

[3] См.: Кузьмин Р. Н. Гамма-лазеры: новые идеи. М., 1978; Бушуев В. А., Кузьмин Р. Н. Проблемы создания лазеров рентгеновского диапазона длин волн. М., 1976.

глощения энергии, о квантах света, о квантовой теории и ее значении в современной физике.

Изучение фотоэффекта, законов, которым подчиняется это явление, их объяснение на основе квантовой теории света, изучение химического действия света и его давления представляют большие возможности для развития понятия «фотон» («квант света»), формирование которого было начато ранее, в курсе биологии VIII класса и в курсе химии X класса, а также для раскрытия перед учащимися правомерности использования закона сохранения и превращения энергии применительно к объяснению световых явлений.

Ознакомление учащихся с дуализмом свойств света, убеждение в материальности его способствует формированию у них понятия о современной квантово-полевой физической картине мира.

Одна из важнейших задач темы — ознакомление десятиклассников с применением в технике явлений фотоэффекта, химического действия света, с ролью фотосинтеза в природе и способами использования этого явления в интересах человека.

В процессе изучения квантовой оптики учащиеся убеждаются в том, что фотон — это не абстракция, позволяющая «удобно» описать оптические явления, а реальная частица.

В теме представляется возможность особенно ярко, полно показать учащимся взаимосвязь и взаимообогащение общефизических, релятивистских, квантовооптических и философских понятий — диалектически-противоречивый характер развития науки (на примере развития представлений о природе света); продемонстрировать школьникам особенности диалектического стиля мышления многих выдающихся ученых-физиков (М. Планк, А. Эйнштейн, А. Г. Столетов, П. Н. Лебедев, К. А. Тимирязев и др.).

Ознакомление с жизнью и деятельностью выдающихся прогрессивных ученых, внесших своими работами вклад в раскрытие сложной природы света и закономерностей, которым подчиняются световые явления,— А. Г. Столетова, П. Н. Лебедева, П. П. Лазарева, С. И. Вавилова, А. Эйнштейна помогает учащимся понять, что настоящий ученый — это и общественный деятель.

На изучение темы программой предусмотрено 12 ч. В соответствии с этим можно рекомендовать следующее распределение материала темы по урокам:

1-й урок. Понятие о квантовой теории (зарождение квантовой теории). Внешний фотоэффект. Работы А. Г. Столетова по изучению фотоэффекта. Законы фотоэффекта.

2-й урок. Теория фотоэффекта. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта. Объяснение законов фотоэффекта на основе квантовой теории света.

3-й урок. Фотоны. Величины, характеризующие фотон. Дуализм света. Опыты С. И. Вавилова по наблюдению флуктуаций света.

4-й урок. Решение задач на уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.

5-й урок. Элементарные акты взаимодействия фотонов с частицами вещества на примере взаимодействия фотонов с электронами.

6-й урок. Применение фотоэффекта. Фотоэлементы, их применение в автоматике.

7-й урок. Запись и воспроизведение звука оптическим методом.

8-й урок. Давление света. Опыты П. Н. Лебедева по обнаружению давления света.

9-й урок. Химическое действие света. Работы П. П. Лазарева по изучению химического действия света. Фотография, ее применение в научных исследованиях, технике и в других областях жизни.

10-й урок. Решение задач. Фотосинтез.

11-й урок. Учебный семинар обобщающего характера по материалу тем «Световые волны», «Излучение и спектры», «Световые кванты. Действия света».

12-й урок. Контрольная работа по темам «Световые волны», «Излучение и спектры», «Световые кванты. Действия света».

1. ПОНЯТИЕ О КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ

Перед началом изучения новых для учащихся квантовых свойств света желательно повторить следующие вопросы:

1. Шкала электромагнитных волн. 2. Экспериментальные факты, свидетельствующие об электромагнитной природе света. 3. Работа сил электрического поля по перемещению заряда в электрическом поле.

Собеседование по этим вопросам на уроке поможет учащимся отчетливее осознать невозможность объяснения новых для них научных фактов (распределение энергии в спектре абсолютно черного тела; независимость энергии вырываемых из вещества электронов под действием света от освещенности поверхности) с точки зрения волновой теории света.

Далее учитель отмечает, что до конца XIX в. все известные оптические явления объяснялись с точки зрения электромагнитной теории света. Все известные в то время факты подтверждали, что природа света едина с природой радиоволн и рентгеновского излучения (см. гл. 16 и 18). Представления об электромагнитной природе света привели ученых к мысли о том, что энергия излучения передается непрерывно — так же, как непрерывно распространяется сама электромагнитная волна. Однако в конце XIX в. были обнаружены явления, которые оказалось невозможно объяснить на основе классической электродинамики. Что же это за явления? Когда и кем они были открыты?

Прежде чем ответить на эти вопросы, учитель предлагает вспомнить, каким образом обнаруживаются те или иные свойства света.

В процессе собеседования учащиеся приходят к выводу, что все известные до сих пор им световые явления обнаруживались по взаимодействию света с веществом.

Все взаимодействия света с веществом сопровождаются определенными изменениями, происходящими с веществом, и изменениями взаимодействующего с ним света. Свет отражается, преломляется, поглощается веществом.

Из курса химии учащимся известны химические реакции, которые происходят при взаимодействии света с веществом.

Изучение явлений, которыми сопровождается взаимодействие света с веществом, законов, которым они подчиняются, позволяет глубже познать природу света, его структуру, его внутреннюю сущность. Такими явлениями, открытие и изучение которых привело к коренным изменениям представлений о природе света, оказались излучение абсолютно черного тела и фотоэффект. Далее рассматривают историю возникновения (введения) в физике понятия «квант» и начало зарождения квантовой теории.

Какое бы понятие ни формировалось у учащихся, должна быть обеспечена мотивировка его введения в науке. А это может быть осуществлено лишь на основе раскрытия недостаточности уже имеющейся в науке системы понятий для объяснения вновь установленных научных фактов, для объяснения вновь открытых явлений или для решения задач, выдвигаемых практикой. При формировании фундаментальных понятий, таких, каким является в физике понятие «квант», соблюдение этого требования теории формирования понятий имеет особенно важное значение. Учащиеся должны знать, хорошо понимать, что понятия в науке вводятся не случайно. Они «возникают» на определенных этапах развития науки в результате разрешения противоречий, возникающих между имеющимися знаниями (понятиями) и научными или практическими задачами. В данном случае таким научным фактом, который привел к введению в науке понятия «квант», явилось установление невозможности объяснить наблюдаемые на опытах закономерности распределения энергии в спектре абсолютно черного тела на основе электромагнитной теории света и законов электромагнетизма, установленных Максвеллом. Электродинамика Максвелла, предсказавшая существование электромагнитных волн и превосходно описывающая процессы их излучения и распространения, пришла в противоречие с вновь установленными фактами.

Сущность противоречия заключалась в следующем. Согласно электромагнитной теории нагретое тело вследствие излучения электромагнитных волн должно охладиться до абсолютного нуля. Однако повседневный опыт показывает, что ничего подобного не происходит. Суть противоречия заключается также в том, что согласно классической физике в сплошном спектре «абсолютно черного тела», нагретого до белого свечения, наибольшее количество энергии должно приходиться на излучение с самой короткой длиной волны. Этот вывод вытекал из всего предыдущего развития

физики. Практические же измерения показали, что при наиболее высоких температурах максимум энергии не находится в области самых коротких волн, т. е. в ультрафиолетовой части спектра излучения.

Немецкий физик Макс Планк (1858—1947) в поисках выхода из создавшегося противоречия высказал мысль, что неверным является исходное положение классической физики о непрерывном излучении света (энергии). Он пришел к выводу, что это положение должно быть заменено новым: свет излучается телом не непрерывно, а дискретно, особыми порциями, которые Планк назвал *квантами*. Позже они были названы фотонами. Планк предположил, что энергия каждой порции пропорциональна частоте излучения:

$$E = h\nu. \quad (1)$$

Коэффициент пропорциональности h в честь ученого был назван позднее постоянной Планка.

О найденном законе распределения энергии в спектре абсолютно черного тела Планк доложил на заседании Берлинского физического общества 19 октября 1900 г. и дал теоретическое его обоснование 14 декабря этого же года. Этот день вошел в историю науки как день рождения квантовой теории. Планк показал, что классический осциллятор не может обладать средней энергией kT, как это должно было бы быть по теореме о равномерном распределении кинетической энергии по степеням свободы, а обладает энергией, соответствующей его частоте:

$$U = \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}. \quad (2)$$

На факультативных занятиях можно сообщить учащимся, что Планк, используя найденную им связь между энергией равновесного излучения в единице объема поля излучения и средней энергией осциллятора

$$E(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} U, \quad (3)$$

получил свою знаменитую формулу для распределения энергии в спектре излучения абсолютно черного тела:

$$E(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \cdot \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}. \quad (4)$$

Эта формула дает хорошее совпадение с опытом. Из нее получается закон Стефана — Больцмана для энергии, излученной абсолютно черным телом с единицы поверхности отверстия ($E = \sigma T^4$, где σ — постоянная Стефана — Больцмана).

Планк записал свою формулу так: $f(\nu) = n(\nu)\, h\nu$, где $n(\nu)$ — число квантов, равное $\frac{8\pi\nu^2}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$, а $h\nu$ — энергия кванта.

Предположение Планка, по существу, означало утверждение о неприменимости законов классической физики к явлениям микромира. Открытие Планка имело настолько важное значение, что оно привело к созданию в последующие годы новой теории — квантовой теории света и нового раздела современной физики — квантовой механики.

2. ПОНЯТИЕ ФОТОЭФФЕКТА

Приступая к изучению явления фотоэффекта, следует отметить, что открытие этого явления и изучение закономерностей его протекания сыграло важную роль в развитии представлений о природе света. Впервые явление фотоэффекта было обнаружено немецким физиком Генрихом Герцем (1857—1894) в 1887 г. Герц заметил, что если освещать ультрафиолетовыми лучами электроды искрового промежутка, находящиеся под напряжением, то разряд наступает при меньшем напряжении на электродах. Однако Герц не мог объяснить этого явления.

Профессор Московского университета Александр Григорьевич Столетов (1839—1896), тщательно изучая это явление, в 1888 г. установил, что открытое Герцем явление может быть объяснено, если предположить, что при действии света на вещество электродов происходит освобождение отрицательных зарядов. Учащиеся могут убедиться в справедливости вывода, сделанного А. Г. Столетовым, на следующем опыте.

На стержне электрометра устанавливают хорошо зачищенную цинковую пластинку (рис. 21.1). Сообщив пластинке и стержню

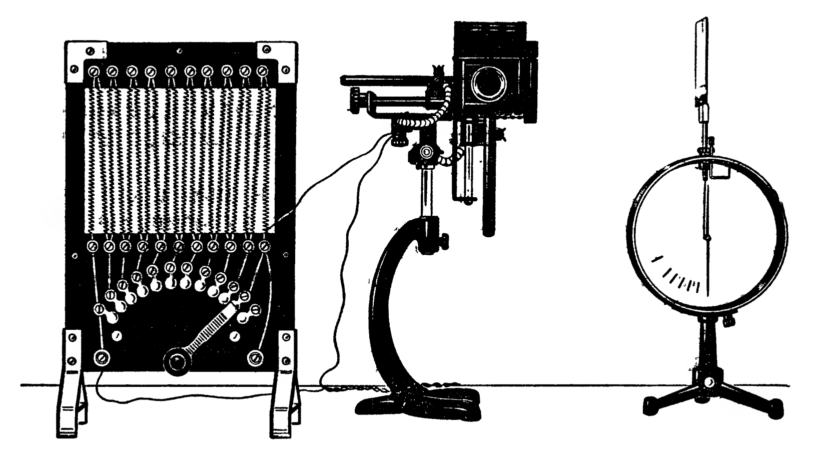


Рис. 21.1

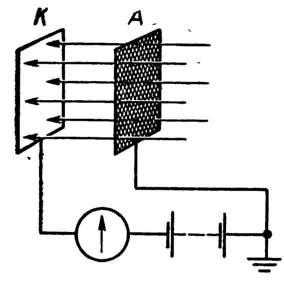


Рис. 21.2

электрометра отрицательный заряд от потертой мехом эбонитовой палочки, направляют на пластинку ультрафиолетовые лучи от электрической дуги или ртутно-кварцевой лампы. Под действием ультрафиолетовых лучей пластинка с электрометром разряжается. Разряд происходит тем быстрее, чем больше световой поток, падающий на пластинку. Если электрометру (а значит, и укрепленной на его стержне пластинке) сообщить положительный заряд от стеклянной палочки, потертой шелком, электроскоп при освещении пластинки ультрафиолетовым светом не разряжается.

Из опыта следует вывод: при освещении металла из него вырываются отрицательные электрические заряды.

А. Г. Столетов, применив к изучению явления фотоэффекта чувствительный гальванометр, открыл основные законы его. Свои исследования он проводил с помощью установки, представленной на рисунке 21.2 (здесь *А* — металлическая сетка, соединенная с положительным полюсом источника тока, *К* — цинковая пластинка, освещаемая пламенем электрической дуги и соединенная с отрицательным полюсом источника тока). Пока пластинка не освещена, гальванометр не обнаруживает наличия тока в цепи. При освещении электрода *К* ультрафиолетовым светом электрической дуги в цепи появляется ток, о чем можно судить по отклонению стрелки гальванометра.

Ток, возникающий в электрической цепи при освещении пластинки, соединенной с отрицательным полюсом источника тока, получил название *фототока.*

А. Г. Столетов изучал зависимость силы фототока от напряжения при постоянном освещении отрицательного электрода. Он установил, что при увеличении напряжения между электродами *А* и *К* сила фототока возрастает и при некотором значении напряжения достигает максимального значения, которое было названо *фототоком насыщения.* При фототоке насыщения все электроны[1], вырывающиеся из катода, достигают анода.

Позднее А. Г. Столетов помещал катод и анод в стеклянный баллон с кварцевым окошечком, из которого выкачивался воздух. Кварцевое окошечко делалось для того, чтобы на катод попадали ультрафиолетовые лучи. Такой прибор получил название фотоэлемента. На опытах с фотоэлементами были открыты основные законы фотоэффекта.

С описанием сущности опытов Столетова, на основе которых

---

[1] Впервые термин «электрон» ввел ирландский физик и математик Стоней. В 1874 г. он рассчитал заряд электрона, т. е. на 23 года раньше, чем был он измерен.

были сформулированы основные законы фотоэффекта, учащиеся могут познакомиться самостоятельно по учебнику «Физика-10» [12, § 112, с. 225—227].

Понятие о фотоэлементе учащиеся могут получить на примере вакуумного фотоэлемента СЦВ или фотоэлемента ЦГ-4, которые имеют размеры, достаточные для того, чтобы весь класс мог увидеть катод и анод фотоэлемента. Детально рассматривать устройство фотоэлемента на данном уроке не следует.

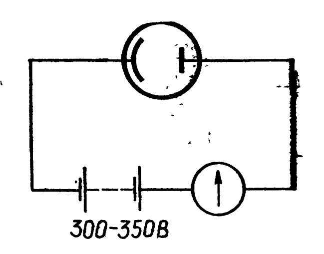


Рис. 21.3

С указанными фотоэлементами могут быть поставлены опыты, поясняющие сущность опытов, проводившихся А. Г. Столетовым. Фототок при использовании фотоэлементов ЦГ-4, СЦВ может быть обнаружен с помощью демонстрационного гальванометра. Установка для опытов собирается в соответствии со схемой, представленной на рисунке 21.3. Для удобства постановки опытов фотоэлемент ЦГ-4 крепят на деревянной панельке.

Замыкая цепь источника тока, обращают внимание учащихся на то, что пока катод не освещен, гальванометр не обнаруживает в цепи тока. Открывая фотоэлемент и направляя на катод свет от мощной электрической лампы с отражателем, показывают возникновение тока в цепи. Если катод фотоэлемента соединить с положительным полюсом источника тока, фототок в цепи не возникает, как бы сильно он ни был освещен.

На основе этого опыта конкретизируется представление учащихся о фототоке и условиях его возникновения.

Увеличивая постепенно подаваемое на фотоэлемент напряжение, добиваются получения фототока насыщения при условии, когда источник света расположен на расстоянии 1 м от фотоэлемента. Опыт сопровождают построением на доске графика зависимости силы фототока от напряжения при постоянном освещении.

Опыт повторяют, предварительно приблизив лампу к фотоэлементу примерно на 0,5 м. Обращают внимание на то, что в последнем случае увеличилась освещенность катода, а значит, и падающий на него световой поток. Снова вычерчивают график зависимости силы фототока от напряжения. Учащимся предлагают сравнить значения фототока насыщения в том и другом случае. Подводят их к выводу: *фототок насыщения тем больше, чем больше падающий на катод световой поток.*

Сообщают, что после того, как было установлено, что из металла под действием света вырываются электроны, оказалось возможным объяснить зависимость силы фототока насыщения от освещенности поверхности. Чем больше освещенность, тем больше вырывается электронов из металла, тем больше сила фототока.

Далее отмечают, что сила фототока зависит также от скорости вырываемых из металла электронов: *кинетическая энергия вылетающих*

фотоэлектронов не зависит от падающего светового потока, а зависит только от длины волны действующего света. Чем короче длина волны падающего на тело света, тем больше энергия вырываемого электрона. Этот экспериментально установленный факт получил название второго закона фотоэффекта.

В том, что лучи света различной длины волны по-разному действуют на вещество, нужно убедить учащихся на опыте.

В предыдущей установке при неизменном положении источника света помещают на пути лучей различные светофильтры. Сила фототока при этом изменяется. При помещении красного светофильтра сила фототока резко снижается (практически становится равной нулю).

Опыты с пластинками из различных металлов показывают, что лучи одной и той же длины волны по-разному действуют на различные вещества.

Изученное явление называется *внешним фотоэффектом.*

В заключение следует четко сформулировать основные законы фотоэффекта, открытые А. Г. Столетовым:

1. Число электронов, освобождаемых светом из вещества в 1 с, прямо пропорционально падающему световому потоку.

2. Энергия электронов, вырываемых из вещества, не зависит от падающего светового потока, а зависит только от длины волны действующего света.

3. Для каждого металла существует своя длинноволновая граница света, при которой наступает фотоэффект. При более длинной волне света фотоэффекта не происходит.

В ознакомительном плане желательно познакомить учащихся с внутренним фотоэффектом, с которым, по существу, они уже встречались при изучении электрических свойств полупроводников в IX классе. Он характеризуется тем, что под действием света у ряда веществ увеличивается число свободных носителей электрических зарядов, в результате чего возрастает электропроводимость вещества (сопротивление уменьшается). Это явление наблюдается в полупроводниках и в диэлектриках (селен, сера, сернистое серебро, галоидные соединения серебра и др.).

Внутренний фотоэффект впервые наблюдался в 1888 г. профессором Казанского университета Ульяниным на селене, сопротивление которого при обычных условиях в 70 млрд. раз больше, чем у меди. Приборы, действие которых основано на изменении электропроводимости вещества под действием света, получили название фоторезисторов. Явление внутреннего фотоэффекта можно показать на опыте с фоторезисторами ФС-К1 или ФС-А1.

Установка для опытов с фоторезистором представлена на рисунке 21.4. В качестве источника тока можно взять батарею аккумуляторов или выпрямитель. Для опыта на фоторезистор достаточно подать напряжение 6—10 В. При освещении фоторезистора рассеянным светом стрелка демонстрационного гальванометра отклоняется соответственно на 1—4 деления (в зависимости от источ-

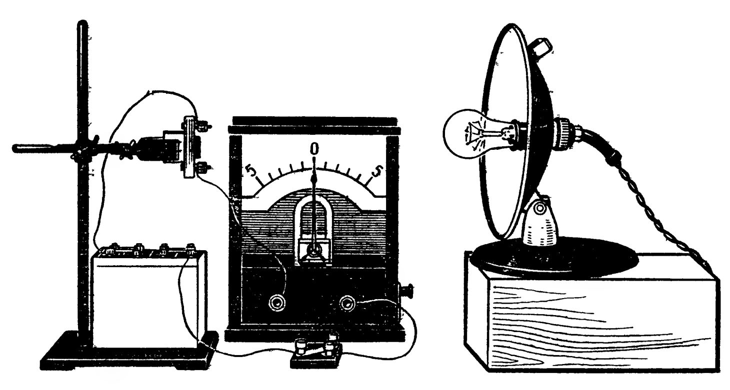


Рис. 21.4

ника света и его расстояния от фоторезистора). Направив на фоторезистор световой поток от лампы мощностью 100 Вт с отражателем, расположенной на расстоянии около 1 м от фоторезистора, показывают увеличение силы тока, что и свидетельствует об уменьшении сопротивления вещества.

3. КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ СВЕТА. ОБЪЯСНЕНИЕ ЗАКОНОВ ФОТОЭФФЕКТА С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ СВЕТА

Изучение данного вопроса может быть осуществлено по следующему плану:

1. Трудности объяснения законов фотоэффекта на основе электромагнитной теории.
2. Квантовая теория фотоэлектрического фотоэффекта и объяснение основных законов фотоэффекта.
3. Выводы квантовой теории о природе света.
4. Упражнения (решение задач).

Повторив законы фотоэффекта, обращают внимание учащихся на то, что перед учеными возникла задача: объяснить законы фотоэффекта на основе господствовавшей в то время электромагнитной теории света. Когда было установлено, что из металла под действием света вырываются электроны, оказалось возможным объяснить первый закон фотоэффекта, выражающий зависимость силы фототока насыщения от освещенности поверхности: *чем больше освещенность, тем больше в единицу времени вырывается электронов из металла, тем больше фототок.*

Затруднения возникли при объяснении на основе волновой теории света второго и третьего законов фотоэффекта. Из всех исследований было очевидно, что электроны, вырывающиеся из вещества под действием света, приобретают энергию за счет энергии поглощенной электромагнитной волны. Так как согласно волновой теории энергия в потоке света распределена непрерывно по

всему объему, следовало ожидать, что, чем больше освещенность поверхности, тем мощнее поток энергии, поглощаемой веществом, тем больше будут скорость и кинетическая энергия вылета электронов из вещества. Однако опыты показали, что в действительности скорость (и энергия), с которой вылетают электроны из вещества, не зависит от освещенности, а зависит только от длины волны света, падающего на поверхность: с уменьшением длины волны света, падающего на поверхность, увеличивается скорость (и энергия), с которой электроны вырываются из вещества.

Волновая теория оказалась не в состоянии объяснить эти экспериментально установленные факты. Это еще раз подтвердило, что представление о свете как о потоке электромагнитных волн, распространяющихся в пространстве, недостаточно, оно не отражает всех свойств света.

Волновая теория оказалась также не в состоянии объяснить, почему световые лучи одной и той же длины волны по-разному действуют на различные металлы, почему для каждого металла существует своя «длинноволновая» граница фотоэлектрического эффекта. Лучи света, имеющие длину волны, бо́льшую граничной, не вызывают фотоэффекта.

А. Эйнштейн предположил, что «наблюдения над «черным излучением», фотолюминесценцией, генерацией катодных лучей ультрафиолетовым светом и некоторые другие группы явлений могут быть лучше поняты, если допустить дискретное распределение энергии в пространстве»[1].

В дальнейшем Эйнштейн, продолжая разработку новых идей, высказывает мысль, «что ближайшая фаза развития теоретической физики приведет нас к теории света, которую можно будет рассматривать как сплав волновой и эмиссионной теорий света»[2].

Он выделяет группу вопросов, на которые волновая теория не может дать ответа: «Почему только от цвета, а не от интенсивности света зависит, наступит или не наступит определенная фотохимическая реакция? Почему коротковолновые лучи вообще химически более активны, чем длинноволновые? Почему скорость порождаемых фотоэлектрически катодных лучей не зависит от интенсивности света? Почему необходима высокая температура, а следовательно, высокие молекулярные энергии, чтобы испускаемое тем самым излучение содержало коротковолновую составную часть?»[3].

В результате долгих размышлений Эйнштейн приходит к выводу, что излучению должны одновременно приписываться волновая и квантовая структуры, и выдвигает гипотезу *световых частиц*, названных позже *фотонами*,— частиц, обладающих энергией и импульсом. Импульс кванта излучения равен

---

[1] Цитируется по кн.: Кудрявцев П. С. История физики. М., 1956, т. III, с. 154.

[2] Там же, с. 158.

[3] Там же.

$$p = \frac{hv}{c}. \qquad (5)$$

В 1910—1913 гг. идеи квантов проникают в спектроскопию и теорию атома. Был сделан вывод о том, что излучение осциллятора осуществляется прерывно, определенными квантами $E = h\nu$. Поглощение энергии электронами также происходит квантами. Энергия поглощенного кванта идет на совершение работы выхода электрона из вещества и на сообщение электрону кинетической энергии:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv^2}{2}. \qquad (6)$$

Записанное уравнение (уравнение Эйнштейна) позволяет объяснить все законы фотоэффекта: и зависимость фототока насыщения от освещенности, и зависимость скорости электронов, вырывающихся из металла под действием света, от длины падающего света, и наличие длинноволновой границы фотоэффекта.

Чтобы учащиеся хорошо уяснили физический смысл уравнения (6) и научились пользоваться им при решении задач, целесообразно посвятить урок решению задач на это уравнение. Часть времени этого урока (начало его) следует посвятить формированию понятия «фотон». При этом следует обратить внимание учащихся на следующие вопросы:

1. Понятие «корпускула» — широкое понятие, охватывающее все частицы («корпускула» — частица).

2. Квант энергии — порция энергии, поглощаемой или излучаемой осциллятором.

3. Фотон (световой квант) — световая частица, обладающая определенной порцией (квантом) энергии.

4. Фотон обладает импульсом $p = \frac{h\nu}{c}$ и энергией $E = h\nu$.

5. Так как согласно теории относительности энергия связана с массой соотношением $E = mc^2$, то масса фотона может быть определена из равенства $h\nu = mc^2$, откуда

$$m = \frac{h\nu}{c^2}. \qquad (7)$$

6. Импульс находится по массе и скорости фотона:

$$p = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}. \qquad (8)$$

Это уравнение связывает воедино волновые и корпускулярные свойства света.

Из равенств $E = h\nu$ и $p = \frac{h\nu}{c}$ следует, что, чем больше частота, чем больше импульс и энергия фотона. Энергия фотонов зеленого

света больше энергии фотонов красного света, а энергия фотонов ультрафиолетовой части спектра больше фотонов зеленого света.

Учащимся можно предложить подсчитать энергию фотонов фиолетового, зеленого и красного света. Они найдут, что эта энергия очень мала: для зеленого света она равна $4 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Следует обратить внимание учащихся на то, что, несмотря на столь малое значение энергии отдельных фотонов, человеческий глаз способен реагировать на различие освещенностей, определяемое единичными квантами. Выдающийся советский физик С. И. Вавилов, наблюдая флуктуации кратковременных световых потоков, установил, что в среднем глаз воспринимает 25 фотонов, соответствующих длине волны $\lambda = 510$ нм, при кратковременных вспышках. Свои наблюдения флуктуации световых потоков Вавилов рассматривал как одно из важнейших доказательств квантовой природы излучения.

Итак, учащиеся должны уяснить, что свет представляет собой *единство* волновых и корпускулярных свойств, т. е. он обладает *дуализмом* свойств.

Следует сообщить, что дуализм свойств обнаружен и у частиц вещества. Французский ученый де Бройль предсказал существование волновых свойств у электронов, высказав мысль о том, что не только частицы света, но и частицы вещества должны обладать одновременно как волновыми, так и корпускулярными свойствами.

Обобщая знания о фотоне, необходимо подчеркнуть, что фотон — структурная единица (квант света) — световая материальная частица. Он самим своим существованием демонстрирует материальность света; он — «главное действующее лицо» всех удивительных качественных превращений, переходов материи полевой в материю «вещественную». Фотон всегда движется со скоростью c. Являясь структурной единицей света, фотоны переносят массу и энергию электромагнитного поля. Во взаимодействиях фотонов с веществом проявляются действия света.

Скорость фотона, как и скорость света, инвариантная величина. Однако, если скорость света в веществе равна $\frac{c}{n}$, где n — абсолютный показатель преломления, то скорость фотона, пока он существует, всегда и везде равна c. Фотон — единственная частица (кроме нейтрино), бытие которой может происходить только в абсолютно равномерном движении. Не будь вещества, он жил бы бесконечно долго, но без вещества он не смог бы и возникнуть; он не имеет собственного объема и поверхности («плоский призрак»), не имеет локализации в пространстве, координаты и траектории (он — возбуждение электромагнитного поля), но имеет массу, спин, энергию, импульс, может быть поляризован.

Фотон — одно из ярких проявлений противоречий материального мира.

4. ФОТОЭЛЕМЕНТЫ, ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Устройство и принцип действия фотоэлементов рассматривают по учебнику «Физика-10» [12, § 115]. Их применение показывают на примере фотореле, срабатывающего при освещении или при пересечении пучка света (автоматы в метро; автоматическое открывание дверей; автоматическая сортировка деталей; включение и выключение источников света при наступлении сумерек и рассвета и т. д.). Некоторые из автоматических устройств, основанных на применении фотоэлементов в сочетании с электромагнитными реле (фотореле), могут быть изготовлены учащимися, работающими в физическом кружке. Учебная промышленность выпускает модели автоматических устройств, подсчитывающих детали на конвейере, и автоматы по сортировке деталей по цвету. Их следует продемонстрировать на уроке. Особое внимание уделяют рассмотрению применения фотоэлементов в записи и воспроизведении звука в кино. Этот материал может быть учениками X класса проработан самостоятельно на уроке [12, § 118].

5. ДАВЛЕНИЕ СВЕТА. ОПЫТЫ П. Н. ЛЕБЕДЕВА ПО ИЗМЕРЕНИЮ ДАВЛЕНИЯ СВЕТА

Опыты П. Н. Лебедева по световому давлению явились первым экспериментальным доказательством наличия механического импульса у световых квантов. Необходимо при изучении вопроса об опытах П. Н. Лебедева подчеркнуть, что опыты Лебедева не только подтвердили электромагнитную теорию света Максвелла, из которой следовал вывод о давлении света, но они явились одним из краеугольных камней квантовой теории света и теории относительности. Тот факт, что свет обладает импульсом и вследствие этого оказывает давление на поглощающую поверхность, сыграл фундаментальную роль в установлении закона Эйнштейна — закона взаимосвязи массы и энергии $E = mc^2$. Классические опыты П. Н. Лебедева по измерению давления света, по словам С. И. Вавилова, по сути дела, явились первым экспериментальным подтверждением закона Эйнштейна.

Гипотеза о давлении света была высказана еще Кеплером на основе наблюдений за отклонением хвостов комет под действием солнечного излучения. В опытах П. Н. Лебедева она нашла подтверждение.

Сущность опытов Лебедева по измерению давления, объяснение механизма возникновения его на основе электромагнитной теории и квантовой теории света достаточно ясно изложены в учебнике [12, 232—233]. Здесь достаточно полно раскрываются трудности, которые удалось преодолеть П. Н. Лебедеву в достижении поставленной цели: а) слишком малое значение измеряемого давления ($4 \cdot 10^{-6}$ Па); б) устранение конвекционных потоков воздуха, возникающих при освещении поверхности, давление света на которую надо было измерить; и др.

Особенно трудными были опыты по обнаружению и измерению давления света на газы, так как оно едва достигает 1% от давления, оказываемого тем же пучком света на зачерненную поверхность твердого тела. Эти измерения заняли более трех лет, в течение которых было построено и испытано более двадцати приборов. Опыты отличались ювелирной точностью и до настоящего времени не были повторены. Полезно (в воспитательных целях) отметить, что к этой сложной работе Лебедев подходил около 20 лет. Еще в 1891 г. он вычислял отталкивающее действие излучения «на меньшие тела», показав, что эта сила при определенных размерах тела может превосходить силу всемирного тяготения.

Желательно сообщить учащимся, что П. Н. Лебедев явился создателем (организатором) первой физической лаборатории в Москве, на базе которой впоследствии был создан Физический институт (открыт был после смерти П. Н. Лебедева). После Октябрьской революции в этом здании размещался Физический институт АН СССР имени П. Н. Лебедева.

6. ХИМИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ СВЕТА. ФОТОГРАФИЯ. ФОТОСИНТЕЗ

Говоря о химическом действии света, следует отметить, что одним из первых вопросами фотохимии занимался П. П. Лазарев, начиная с 1907 г. Однако его итоговые работы «Основы учения о химическом действии света» и «Ионная теория возбуждения» были изданы только после Октябрьской революции. П. П. Лазарев был организатором Государственного биофизического института; из школы Лазарева вышли такие видные ученые, как С. И. Вавилов, в будущем президент АН СССР, Э. В. Шпольский и др.

В связи с рассмотрением процесса фотографии желательно продемонстрировать на уроке получение негатива. Для этого нужно приготовить лист фотобумаги, при красном свете положить на него какой-либо предмет (например, плоский ключ, вырезанную из плотной бумаги звезду и т. п.), затем, задав экспозицию, включить свет и направить на фотобумагу пучок света от лампы с отражателем. Снова выключить свет и положить фотобумагу в раствор проявителя, а затем — в раствор закрепителя. «Фотография» готова. Демонстрация не занимает много времени и, как правило, вызывает большой интерес у учащихся.

В учебнике «Физика-10» отсутствуют примеры химических реакций, происходящих под действием света, не раскрывается должным образом и суть химического действия света. Поэтому желательно дать хотя бы самое краткое пояснение. При облучении светом вещества молекулы вещества поглощают фотоны света, несущие с собой кванты энергии. Чем больший квант энергии поглощает молекула, тем активнее она становится к химическим превращениям. Так, например, при длине волны поглощенного света в 480 нм энергия кванта составляет $4{,}07 \cdot 10^{-12}$ эВ. Средняя же кинетичес-

кая энергия отдельных молекул достигает такого значения лишь при температуре 20 000 °С. Иначе говоря, облучение видимым светом вещества может вызвать такое же эффективное расщепление молекулы, как и нагревание его на 20 000 °С. Облучение более коротковолновым светом приводит к еще большим эффектам.

Важнейшую роль играет свет в образовании хлорофилла в листьях растений. Дыхание всех живых существ сопровождается окислением углерода, входящего в состав их тела. Сгорание углерода в углекислоту CO_2 сопровождается освобождением энергии, которая используется животными при движении.

Обратный процесс расщепления CO_2 происходит в зеленых листьях растений под действием солнечного света, как фотохимический процесс. Расщепление углекислоты сопровождается химическими превращениями, приводящими в конце концов к образованию тех основных органических соединений, из которых построено тело растений и животных. Таким образом, этот «великий круговорот углерода» в природе осуществляется благодаря фотохимическому превращению. Энергия, получаемая при этом за счет солнечного излучения, является главным источником энергии на Земле.

Реакцию, происходящую в растении под действием света, можно записать так:

$$6\,CO_2 + 12\,H_2O + h\nu = C_6H_{12}O_6 + 6\,H_2O + 6\,O_2.$$

Необходимо подчеркнуть, что фотосинтез — основа сельскохозяйственного производства, так как продукция растениеводства на 90% состоит из органических веществ, образующихся в процессе фотосинтеза из неорганических веществ. Сам процесс фотосинтеза очень сложный. Большой вклад в его изучение внесли русские ученые К. А. Тимирязев, С. П. Костычев; советские ученые А. Н. Теренин, А. А. Ничипорович и др. Материал по этому вопросу учитель может взять из книги [78, с. 150—153].

7. ОБОБЩЕНИЕ ПО РАЗДЕЛУ И ТЕМЕ

Знания, полученные учащимися в процессе изучения отдельных тем раздела и на отдельных уроках, останутся разрозненными, в достаточной мере не систематизированными и не обобщенными, если в заключение изучения раздела не провести обобщающего повторения. Это обобщение и повторение может быть проведено в форме: 1) урока-повторения, 2) обобщающей лекции, 3) обобщающего семинара. Наиболее эффективным является последний способ повторения, так как он требует активной самостоятельной работы учащихся. Подготовка к заключительному обобщающему семинару ведется на протяжении всего изучения заключительной темы: акцентируется внимание на вопросах, которые будут вынесены на семинар, дается дополнительная литература, предлагаются темы докладов и сообщений по вопросам, заинтересовавшим учащихся

по ходу изучения темы, предлагаются темы рефератов, ведутся консультации и т. д.

В программу семинара желательно включить следующие вопросы:

1. Предмет науки оптики. Основные разделы оптики.
2. Основные этапы развития оптики и соответствующие им представления о свете.
3. Геометрическая оптика. Модели света в геометрической оптике.
4. Волновая оптика, ее модели (Френель, Юнг).
5. Электромагнитная теория света, ее экспериментальные подтверждения (опыты Герца, Лебедева, Глагольевой-Аркадьевой).
6. Научные факты, послужившие основой для разработки квантовой теории света. Основные положения квантовой теории света.
7. Современные представления о природе света.

ФИЗИКА АТОМА И АТОМНОГО ЯДРА

ВВЕДЕНИЕ

Данный раздел является заключительным в школьном курсе физики. Он призван систематизировать и обобщить огромный багаж знаний по строению вещества, накопленных учащимися на протяжении всего курса физики и химии (см. таблицу на с.316). Должны быть раскрыты важные диалектические выводы о качественном своеобразии законов микромира и их познаваемости, учащиеся должны получить представление об идеях квантовой теории.

В мире атома вместо классических законов движения — законов Ньютона — действуют особые квантовые законы. В наиболее доступной и достаточно наглядной форме они выглядят в волновой теории де Бройля — Шредингера.

Как известно, в 1923 г. Луи де Бройль высказал гипотезу о волновых свойствах микрочастиц (электронов и др.): движению микрочастиц, имеющих импульс p, может быть сопоставлена некая волна, характеризуемая соотношением де Бройля:

$$\lambda = \frac{h}{p}, \quad (1)$$

где h — постоянная Планка, λ — длина волны.

Эта идея была навеяна давно известной в физике аналогией Гамильтона между законами геометрической оптики и законами движения корпускул[1]. С другой стороны, в современной оптике установлено единство корпускулярно-волновых свойств света: будучи электромагнитной волной, свет проявляет и свойства корпускул (фотонов). Де Бройль предположил, что имеется аналогия

[1] Доступное для учащихся изложение подобной аналогии дано в кн.: А. С. Компанеец. Что такое квантовая механика. М., 1977.

не только между механикой и геометрической оптикой, но и между волновой оптикой и движением вещества: волновой оптике следует сопоставить некую волновую механику. Установленные для света соотношения:

$$E = h\nu, \tag{2}$$

$$p = \frac{h}{\lambda} \tag{3}$$

де Бройль распространил и на частицы вещества. Так появилась формула де Бройля (1).

Корпускулярно-волновая идея де Бройля сформировалась не только под влиянием оптико-механической аналогии, но и в связи со странными для классической механики дискретными энергетическими состояниями электронов в атомах, установленными теорией Бора. Целые квантовые числа $n = 1, 2, 3, \ldots$, определяющие дискретный «набор» энергетических уровней водорода (и других атомов), заставляли думать об аналогии со стоячими волнами, для которых характерен дискретный набор длин волн. Де Бройль пишет: «В применении к внутриатомным электронам волновая механика позволяет использовать квантовые условия, определяющие стационарные орбиты Бора, как аналог условиям резонанса и выражает тот факт, что волна, связанная с электроном, является стоячей волной. Появление в этих условиях целых чисел стало вполне естественным»[1]. Это сразу же «объясняет» боровское правило квантования круговых орбит: на орбите должно уложиться целое число волн де Бройля, в противном случае (при многократном «сбходе» орбиты) волна уничтожится. Отсюда — правило квантования:

$$n\lambda = 2\pi r_n. \tag{4}$$

Учитывая формулу (1), получаем: $n\frac{h}{p} = 2\pi r_n$, или

$$n\frac{h}{2\pi} = r_n p = r_n mv. \tag{5}$$

Это и есть правило квантования круговых орбит в первой квантовой теории Бора, которое приводится в учебнике физики для X класса.

Волновые свойства микрочастиц (электронов, нейтронов, атомов и т. п.) подтверждены многочисленными опытами по наблюдению дифракционной и интерференционной картин, полученных от пучков частиц. В качестве дифракционных решеток в этих опытах применяются кристаллические тела так же, как и в опытах с рентгеновскими лучами. Осуществлены также дифракционные опыты на щели, на крае непрозрачного экрана и другие, совершенно аналогичные дифракционным и интерференционным опытам в оп-

[1] Луи де Бройль. По тропам науки. М., 1962.

Основные этапы изучения строения атома в курсах физики и химии

VI класс (физика)	VII класс (физика)	VIII класс (химия)	IX класс (физика)	X класс (физика)
Первоначальные сведения о строении вещества	Дискретность заряда. Электрон. Ядерная модель атома. Заряд ядра, число электронов в атоме	Электронные оболочки атомов. Периодический закон Д. И. Менделеева. Состояние электронов в атомах. Химическая связь и структура электронного «облака». Кристаллическая решетка. Состав ядра. Изотопы. Превращение химических элементов	Электропроводимость вещества. Электролиз. Значение элементарного заряда	Оптические спектры атомов. Стационарные состояния атомов. Квантовая теория строения атомов. Энергетические уровни. Экспериментальные обоснования квантовой теории. Ядерная физика

тическом и рентгеновском диапазонах электромагнитных волн. Электронография и нейтронография, наряду с рентгенографией, стали мощным средством исследования структуры тел.

Какова же природа волн, связанных с движущимися частицами? Это не электромагнитные и тем более не звуковые волны. Они были предсказаны, обнаружены и применены задолго до того, как физики поняли их смысл. Общепринятая трактовка состоит в следующем: квадрат амплитуды волны де Бройля (ее интенсивность) пропорционален вероятности обнаружения частицы в данном месте и в данный момент. Следует отметить, что такой же смысл вкладывается в «фотонную» интерпретацию электромагнитных волн: интенсивность электромагнитной волны определяет вероятность попадания фотонов в данную точку пространства.

Квантовая природа микрочастиц проявляется и в ядерной физике. Так, спектр γ-излучения является *линейчатым*, что говорит об оболочечном строении ядра. Об этом же свидетельствует и тот факт, что в ядерной физике, как и в атомной, «действуют» определенные наборы чисел (так называемые «магические» числа), характеризующие структуру и свойства ядра. Вероятностный характер микропроцессов проявляется в статистическом законе радиоактивного распада.

Состояние микрочастиц определяется в *квантовой механике* волновой функцией $\psi(x, y, z, t)$, квадрат модуля которой и определяет вероятность пребывания частицы в данном месте и в данное мгновение.

Волновая функция может быть вычислена с помощью уравнения Шредингера.

На рисунке 22.1 показано рассчитанное на основе уравнения Шредингера пространственное распределение вероятности для разных состояний водородоподобных атомов. Ничего похожего на орбиты здесь усмотреть нельзя. Иногда подобные наглядные картинки называют «электронным облаком»[1]. Хотя этот термин и весьма выразителен, следует все же иметь в виду, что современная трактовка решения уравнения Шредингера является вероятностной и отнюдь не означает расплывчатости электрона в атоме. Вместо классического представления о движении электрона по орбите и, стало быть, о возможности для каждого момента времени задать точную координату частицы, в квантовой теории рассматривается пространственное распределение вероятности местопребывания частицы. В стационарных состояниях это пространственное распределение не меняется во времени, поэтому нет никаких колебаний заря-

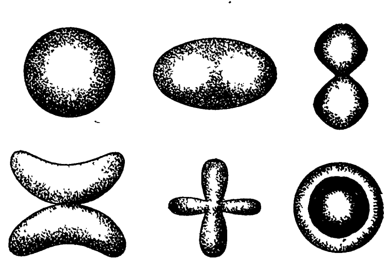


Рис. 22.1

[1] Это название применяется и в школьном учебнике химии.

дов и никаких излучений. При таком подходе, естественно, нет и противоречий теории атома с электродинамикой. Это противоречие возникает тогда, когда пытаются представить движение электрона *классически*, как последовательное прохождение им различных точек траектории. Расчеты показывают, что боровские орбиты совпадают с совокупностью тех мест пространства, для которых вероятности местонахождения электрона максимальны (по сравнению с другими точками).

Квантовая механика не отвергает полностью классические понятия в применении к микрообъектам, а указывает границы применимости этих понятий.

Выше изложенное выявляет возможную перспективу развития школьного курса физики путем отражения в нем идеи универсальности корпускулярно-волновой природы микрочастиц, ее вероятностной интерпретации, квантования энергии (и других величин) в случае связанной микрочастицы и связь квантования с корпускулярно-волновой природой.

Данным разделом завершается весь курс физики. Поэтому он приобретает большое значение в формировании научного мировоззрения учащихся, в раскрытии современной физической картины мира. В процессе его преподавания учитель может на ярких и убедительных примерах показать познаваемость мира на всех уровнях, неисчерпаемость материи, качественное своеобразие ее свойств в макро- и микромире, диалектическое соотношение абсолютной и относительной истины, являющихся отражением объективной истины.

Особое значение приобретает проблема наглядности в преподавании микрофизики[1]. Зачастую в качестве средств наглядности здесь выступают графические образы: энергетические уровни, «облако вероятности», потенциальная кривая и др. Это дает возможность повысить уровень абстрактного мышления учащихся.

Большое воспитательное воздействие на учащихся окажут рассказы об огромных успехах отечественной науки и техники в атомной и ядерной физике.

ГЛАВА 22

ФИЗИКА АТОМА

В разделе «Физика атома» подводится итог длительного изучения учащимися этого вопроса. Идеи структуры вещества пронизывают весь курс химии и физики. К моменту изучения темы «Физика атома» в X классе учащиеся уже столкнулись с проявлением слож-

[1] См.: Пеннер Д. И. Проблема модельности и наглядности в преподавании атомной физики. — Физика в школе, 1970, № 2; Пеннер Д. И. Использование моделей при изучении ядерной физики. — Физика в школе, 1978, № 2.

ного строения атома в многочисленных химических и физических явлениях. Полезно обобщить знания учащихся, повторив такие вопросы, как открытие и исследование свойств электронов, связь химических свойств атомов со структурой электронных оболочек вещества, электрические и магнитные свойства вещества, а также линейчатый спектр атомов и спектральный анализ. Все эти факты и явления определяют то большое значение, которое имеет в современной науке учение о строении атомов. Так учащиеся подводятся к познавательной проблеме: каковы физические законы, управляющие внутриатомным миром? Каковы экспериментальные обоснования этих законов? Эти вопросы и составляют содержание темы «Строение атома».

Поурочное распределение материала может быть следующим:

1-й урок. Повторение вопросов физики и химии, связанных со структурой атомов. Строение атома. Опыты Резерфорда.

2-й урок. Планетарная модель атома. Квантовые постулаты Бора.

3-й урок. Модель атома водорода по Бору. Стационарные состояния и их экспериментальное подтверждение.

1. СТРОЕНИЕ АТОМА. ОПЫТЫ РЕЗЕРФОРДА ПО РАССЕЯНИЮ α-ЧАСТИЦ

«Если принять в расчет большую скорость (около $1,8 \cdot 10^9$ см/с) и массу α-частиц, то кажется удивительным, что некоторые из α-частиц внутри слоя золота толщиной $6 \cdot 10^{-5}$ см могут изменять направление на угол 90° и даже больше»[1]. Так писали Гейгер и Марсден в 1909 г. в первом сообщении о своих опытах, предпринятых по предложению Резерфорда.

Почему же рассеивание α-частиц на большие углы казалось столь поразительным? Учащиеся смогут это понять, решив следующую задачу:

Каким должен быть заряд шара диаметром 10^{-8} см (размер атома), чтобы отбросить α-частицу назад?

Решение. Полагаем $v = 2 \cdot 10^9$ см/с, тогда, применив формулу $\frac{q_я q_\alpha}{\pi\varepsilon_0 R} = \frac{m_\alpha v_\alpha^2}{2}$ [12, с. 240], получим: $q_я \approx 5 \cdot 10^{-14}$ Кл. Таким образом, атом должен был бы иметь избыточный положительный заряд, распределенный по объему атома и равный $5 \cdot 10^{-14}$ Кл, что составляет примерно 320 000 элементарных зарядов! Нейтральный атом должен был бы содержать в таком случае столько же электронов. Но тогда их полная масса превышала бы массу атома золота. Учитывая малую массу и заряд электрона, Резерфорд предположил, что α-частицы рассеиваются массивной положительно заряженной частью атома размером 10^{-12} см.

[1] Глесстон Г. Атом. Атомное ядро. Атомная энергия. М., 1967, с. 102.

Теперь все становится понятным: уменьшение радиуса заряженного шара в 10^4 раз означает, что заряд $q_я$ (и число электронов в атоме ядра), согласно приведенной выше формуле, должен быть меньше во столько же раз.

Полезно продемонстрировать модельные опыты по отклонению частиц в силовых полях. Интересна демонстрация магнитной модели опыта Резерфорда, в которой используются керамические магниты, движущиеся на воздушной подушке[1]. Следует также показать учащимся фотографии рассеяния α-частиц в газе, полученные в камере Вильсона [19, т. I, с. 98]. Они доказывают, что отклонение α-частицы на большой угол происходит при одноразовом столкновении ее с атомом. Фрагмент «Опыт Резерфорда» из учебного кинофильма «Атом и атомное ядро» дополнит модельный опыт по рассеянию α-частиц.

Используя данные опытов Резерфорда, далее обсуждают с учащимися гипотезу о планетарной модели атома [12, § 120]. Первоначальные представления о ней, по существу, использовались с самого начала введения электронной теории уже в VII классе. Поэтому основная задача в данном случае — показать трудности, возникающие при использовании в данной модели законов классической механики и электродинамики Максвелла. Эти законы не могут объяснить устойчивость атомов в невозбужденном состоянии, поскольку ускоренное движение электронов на орбитах должно сопровождаться быстрой потерей энергии на излучение электромагнитных волн.

2. КВАНТОВЫЕ ПОСТУЛАТЫ БОРА

Великий датский физик Нильс Бор (1885—1962) одним из первых понял неприменимость к атомным системам классической электродинамики и нашел правильный путь решения проблемы, применив к ядерной модели атома Резерфорда квантовые представления Планка.

Для этого было необходимо ввести атомистические предположения об испускании и поглощении излучения. Бор выдвигает пять предположений [37, с. 222—223; 39, с. 252—253], основное содержание которых в учебниках физики [см: 16; 20] в настоящее время обычно формулируется в виде двух постулатов, одна из возможных и кратких формулировок которых приведена в учебнике «Физика-10» и должна быть усвоена учащимися [12, с. 243].

Из постулатов Бора следует, что атом испускает или поглощает энергию только при переходе из одного стационарного состояния в другое, притом в виде порций монохроматического света, энергия которых $h\nu = E_2 - E_1$.

[1] См.: Вильке Г. И. Приставка к кодоскопу для создания воздушной подушки и некоторые опыты с ней.— Физика в школе, 1977, № 4.

Рассматривая постулаты Бора, следует сказать о том, что современная квантовая механика полностью сохранила идею Бора о стационарных состояниях и дискретных энергетических уровнях.

Однако квантовая механика отказалась от наглядного представления об электронах как о частицах, движущихся по классическим законам по орбитам.

Опираясь на знания учащихся об «электронном облаке», можно в осведомительном плане рассказать о современных взглядах на внутриатомный мир.

В стационарном состоянии электронное *облако не изменяется* со временем, вследствие чего нет и колебаний зарядов, а значит, и излучения электромагнитных волн. Излучение атома возникает *при переходе из одного стационарного состояния в другое*, потому что при этом изменяется форма электронного облака (см. рис. 22.1) и, следовательно, происходит пространственное *перераспределение заряда* (чего нет в определенном стационарном состоянии).

На внеклассных занятиях желательно ознакомить учащихся более подробно с великими открытиями в мире атома и биографиями Резерфорда и Бора, порекомендовать им чтение соответствующей литературы [37; 47; 100].

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВА ПОСТУЛАТОВ БОРА

Эти доказательства следует привести до рассмотрения количественной теории Бора, которая применима, вообще говоря, лишь к водородоподобным атомам, в то время как постулаты Бора применимы ко всем атомам.

Наиболее убедительно факт существования стационарных состояний доказывают опыты Дж. Франка и Г. Герца.

Схема и результаты опыта Франка и Герца приведены в учебнике [12, рис. 252, 253]. Желательно более подробно объяснить назначение задерживающего поля с напряжением около 9,5 В. Оно нужно для того, чтобы задержать электроны, испытавшие неупругие столкновения с атомами ртути и потерявшие свою энергию. Благодаря этому электроны не смогут попасть на анод, что проявится в уменьшении анодного тока при неупругих столкновениях электронов с атомами. Именно спад тока и свидетельствует о неупругих ударах.

Описание опыта Франка и Герца имеется в методической литературе[1]. Опыт демонстрируют с тиратроном типа ТГ-1-0,1/1,3 (рис. 22.2). Между сеткой и катодом тиратрона создают переменное напряжение от звукового генератора. С реостата напряжение подается на вертикальный выход осциллографа. При небольшом

---

[1] См.: Перкальскис. Использование современных научных средств в физических демонстрациях. М., 1966.

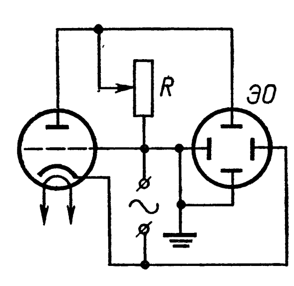



Рис. 22.2

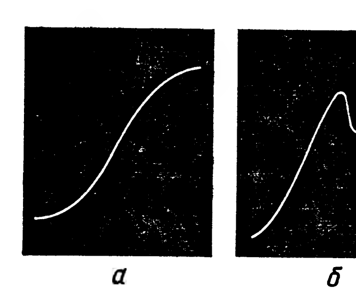


Рис. 22.3

напряжении между сеткой и катодом осциллограмма имеет вид, характерный для вольт-амперной характеристики вакуумного триода (рис. 22.3, *а*). При увеличении амплитуды ускоряющего поля на кривой появляются провалы (рис. 22.3, *б*), свидетельствующие о возникновении неупругих ударов, вызывающих возбуждение атомов газа. В тиратроне появляется свечение. Сопротивление реостата порядка нескольких десятков килоом. В качестве реостата в цепи накала (на рисунке 22.2 не показан) можно использовать реостат из лабораторных наборов по электричеству.

Другой опыт по наблюдению стационарных состояний можно осуществить с неоновой лампой или газотроном (демонстрация существования потенциала зажигания). Согласно квантовой теории, для ионизации атомов данного элемента требуется определенная минимальная энергия (например, для атомов водорода 13,6 эВ). Если ионизация осуществляется с помощью ускоренных электрическим полем электронов (в газотроне или неоновой лампе), то она возникает лишь при определенных минимальных напряжениях ускоряющего поля. Эта определенность напряжения «зажигания» и свидетельствует о наличии стационарных состояний атомов.

4. РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УРОВНЕЙ ВОДОРОДА

Обращают внимание учащихся на то, что атомная теория должна объяснить все свойства атомов, и прежде всего структуру их спектров. Исторически именно изучение спектров и было тем «окном», заглянув в которое физики увидели особый внутриатомный мир[1]. Можно сообщить учащимся (в осведомительном плане), что в спектре водорода обнаружена закономерность:

$$\nu = R\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2}\right), \qquad (1)$$

где R — постоянная для всех линий спектра. Как получить эту формулу? Эту проблему и разрешила теория Бора для простейшего

[1] См.: Яворский Б. М. Роль исследования спектра водорода в развитии боровской теории атома. — Физика в школе, 1976, № 2.

атома — водорода́. Постулат о связи частоты излучения с энергией подсказывает путь решения проблемы: надо рассчитать энергии стационарных состояний атома.

При выводе формулы энергии электрона в атоме следует тщательно обсудить физический смысл отрицательной полной энергии. Кинетическая энергия всегда положительна; знак полной энергии определяется суммой кинетической и потенциальной энергии.

Потенциальная энергия свободного электрона (т. е. бесконечно удаленного от ядра) принята за нулевой уровень. Тогда потенциальная энергия связанного электрона будет отрицательной (ввиду того что при действии сил притяжения потенциальная энергия уменьшается по мере приближения частиц друг к другу, учащиеся могут себе мысленно представить образование атома как процесс сближения электрона и ядра).

Отрицательный знак полной энергии означает, что кинетической энергии электрона недостаточно, чтобы электрон покинул атом, преодолев притяжение ядра. Электрон «связан» в атоме, как бы сидит в «потенциальной яме». Здесь полезно привести механическую аналогию — шарик в «потенциальной яме» (рис. 22.4). Если принять потенциальную энергию шарика в верхней части сферической чашки за нулевой уровень, то на дне чашки шарик имеет отрицательную потенциальную энергию. Сообщив некоторую энергию (которая меньше модуля потенциальной энергии), можно заставить шарик колебаться, но выйти за пределы ямы он не сможет. Его полная энергия при этом отрицательна, он «сидит в потенциальной яме». Для освобождения шарика надо сообщить ему такую кинетическую энергию, чтобы он мог вылететь за пределы «ямы». Очевидно, полная энергия при этом станет положительной. Полезно привести график зависимости от расстояния потенциальной энергии электрона в кулоновском поле ядра (рис. 22.5).

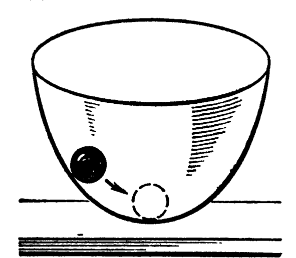


Рис. 22.4

Далее выводят формулу энергии стационарных состояний атома водорода:

$$E_n = -\frac{1}{(4\pi\varepsilon_0)^2} \cdot \frac{me^4}{2\hbar^2 n^2}. \qquad (2)$$

В качестве упражнения рассчитывают значения энергии для нескольких стационарных состояний ($n = 1, 2, 3, 4$). Для упрощения расчетов следует учесть вытекающее из формулы (2) соотношение $E_n = \frac{E_1}{n^2}$.

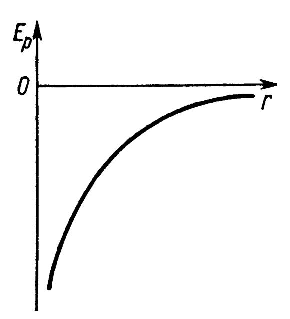


Рис. 22.5

На основе полученных чисел учащиеся строят диаграмму энергетических уровней (рис. 22.6). Нужно обратить их внимание на

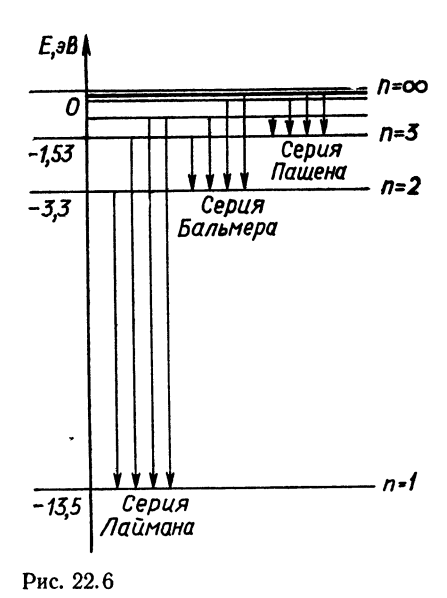


Рис. 22.6

то, что расстояние между уровнями все более и более сокращается, приближаясь к нулю по мере подхода электрона к свободному состоянию (т. е. при $n \to \infty$). Следовательно, при больших квантовых числах энергию можно считать непрерывно изменяющейся, что характерно для классической физики. Значит, в предельном случае выводы квантовой механики совпадают с выводами классической механики. Этот факт имеет большое методологическое значение, указывая на преемственность квантовой и классической механики. Аналогичное соответствие устанавливается и в специальной теории относительности (при $v \ll c$).

Полезно предложить учащимся объяснить с помощью диаграммы энергетических уровней происхождение серий в спектре водорода (см. рис. 22.6). При наличии времени можно предложить такую задачу:

Рассчитать частоты головных линий (линий наименьшей частоты) первых трех серий спектра водорода.

Решение. В формулу (1) подставляют соответствующие квантовые числа: $n = 1$, $k = 2$ (серия Лаймана, ультрафиолетовое излучение); $n = 2$, $k = 3$ (серия Бальмера, видимый свет); $n = 3$, $k = 4$ (серия Пашена, инфракрасные лучи).

Это упражнение важно в том отношении, что показывает *единство* природы ультрафиолетового, видимого и инфракрасного излучений.

5. ОБЪЯСНЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ЯВЛЕНИЙ НА ОСНОВЕ КВАНТОВЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ

Важно показать учащимся, как «работают» квантовые понятия о стационарных состояниях. В качестве примеров можно рассмотреть объяснение спектров атомов, молекул, твердых тел, принцип работы лазера. Все эти вопросы излагаются только в осведомительном плане.

Энергетические уровни и спектры атомов, молекул, твердых тел. В качественной форме, опираясь на наглядные энергетические диаграммы, объясняют различия в спектрах атомов, молекул и конденсированных систем (твердых тел). Желательно в рассужде-

ниях учитывать известный учащимся из курса химии принцип запрета: в одном квантовом состоянии (на одном квантовом уровне) может находиться лишь два электрона. В силу этого принципа электроны вещества, находящегося в нормальном состоянии, занимают нижнюю группу уровней, вплоть до какого-то верхнего уровня. Всякие переходы возможны лишь на свободные уровни энергии. Это и объясняет, почему оптическое излучение обусловлено квантовыми переходами валентных электронов.

На рисунке 22.7 изображены диаграммы уровней энергии валентных электронов: *а* — атома, *б* — молекулы, *в* — металла, *г* — полупроводника. Стрелки указывают возможные переходы электронов при возбуждении (стрелки вверх) и излучении (стрелки вниз). Характер оптических спектров определяется структурой энергетического спектра. Отдельные уровни П (рис. 22.7, *г*) соответствуют атомам примеси.

Лазер. В лазерах применяется явление индуцированного излучения. В отличие от всех других источников света — как природных, так и искусственно созданных человеком — лазер дает когерентное излучение.

С помощью простейших диаграмм энергетических уровней [12, с. 250] дают элементарное объяснение явлению индуцированного излучения и принципа работы лазера. Отмечают выдающиеся результаты советских ученых в создании лазеров.

При наличии времени можно ознакомить учащихся с некоторыми положениями квантовой теории проводимости кристаллов (металлов, полупроводников и изоляторов), а также механизмом возникновения характеристического рентгеновского излучения.

ГЛАВА 23

АТОМНОЕ ЯДРО

В этом разделе изучаются основы физики атомного ядра, на которой базируется ядерная техника. Это придает разделу большое политехническое значение. В то же время изучение явлений на

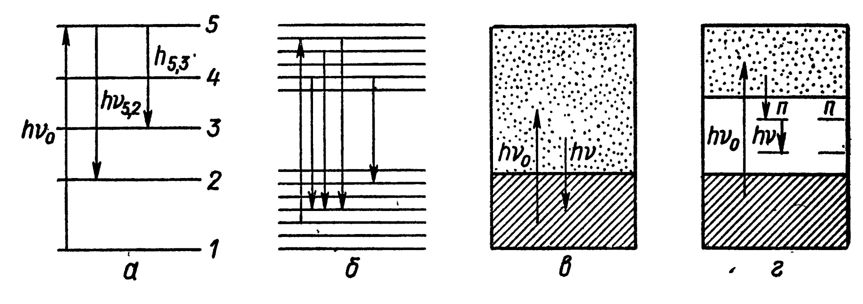


Рис. 22.7

субатомном уровне раскрывает идею познаваемости природы и неисчерпаемости материи, формируя тем самым диалектическое мышление учащихся. Содержание раздела отражается следующим возможным поурочным распределением материала:

1-й урок. Методы наблюдения и регистрации частиц.
2-й урок. Радиоактивность.
3-й урок. Закон радиоактивного распада.
4-й урок. Открытие нейтрона. Свойства протона и нейтрона.
5-й урок. Состав ядра. Изотопы.
6-й урок. Энергия связи ядер. Ядерные силы.
7-й урок. Ядерные реакции.
8-й урок. Искусственная радиоактивность.
9-й урок. Энергетический выход ядерных реакций.

1. МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЯ И РЕГИСТРАЦИИ ЧАСТИЦ

В основе всех методов лежит взаимодействие частиц с веществом. Благодаря большой энергии частиц удается зафиксировать и «сосчитать» отдельные частицы. В большинстве детекторов используется ионизирующее действие заряженных частиц, а также γ-квантов. Последние производят ионизацию (в зависимости от их энергии) в результате фотоэффекта, комптон-эффекта и, наконец, рождения электронно-позитронной пары.

Нейтроны, ввиду отсутствия электрического заряда, сами не производят ионизацию, но они эффективно взаимодействуют с ядрами некоторых элементов (например, бора). При этом в результате ядерных реакций образуются α-частицы, которые и ионизируют газ счетчика. Стенки счетчика нейтронов покрывают бором или вводят его в рабочий газ.

Помимо ионизации, применяется и явление возбуждения заряженными частицами атомов некоторых веществ (люминофоров), что вызывает вспышки люминесценции (сцинтилляции); последние регистрируются в современных приборах фотоумножителями.

Выдающимся вкладом в науку и ядерную технику является создание черенковских счетчиков, в которых используется свечение Вавилова — Черенкова.

Все методы наблюдения и регистрации частиц можно подразделить на две группы: счетные и трековые. К первым относятся, например, счетчик Гейгера — Мюллера и счетчик сцинтилляционный черенковский, ко вторым принадлежат камера Вильсона, пузырьковая и искровая камеры, толстослойные фотоэмульсии.

При объяснении взаимодействия частицы с веществом нагляден следующий модельный опыт. Плоскую прозрачную кювету помещают в диаскоп (или кодоскоп) для проецирования. На дно кюветы наносят несколько капель воды и помещают небольшой шарик (в качестве кюветы можно воспользоваться прибором для моделирования броуновского движения; надо только снять верхнюю крышку и вынуть все шарики, оставив один). Толкнув шарик, наблюдают

его след, оставленный им благодаря взаимодействию с «веществом» счетчика — каплями воды. Шарик на своем пути отрывает от капель «осколки» и остается «трек». Подбором размеров капель и расстояний между ними можно легко добиться того, что «трек» шарика будет иметь различный вид и «пробег» будет зависеть от его скорости. Помещая на пути шарика другой, неподвижный, показывают «вилку», возникающую при столкновении «частиц». Подобная демонстрация позволяет понять принцип исследования частиц по их трекам в камере Вильсона или в других трековых устройствах.

По этой теме желательно показать кинофильм «Экспериментальные методы регистрации элементарных частиц».

2. ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА

В данной теме наиболее существенный момент — раскрытие *статистического* характера закона радиоактивного распада. Предсказать момент распада какого-либо конкретного ядра невозможно: оно может «жить» как угодно долго. Но в большой совокупности радиоактивных ядер выполняется простой закон (который называют экспоненциальным или логарифмическим):

$$N = N_0 \cdot 2^{-t/T}. \qquad (1)$$

Обоснование вывода этого закона приводится в учебнике [12, с. 263]. Экспоненциальный характер закона (1) свидетельствует о том, что число распадающихся за единицу времени ядер пропорционально имеющемуся числу ядер. Учащиеся убедятся в этом, продифференцировав по времени уравнение (1):

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{\ln 2}{T} N_0 \cdot 2^{-t/T} = -\frac{\ln 2}{T} N;$$

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N, \qquad (2)$$

где λ — постоянная распада, равная

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T} = \frac{0,693}{T}. \qquad (3)$$

Соотношение (2) выражает закон радиоактивного распада в дифференциальной форме. Его смысл заключается в том, что скорость распада определяется лишь общим числом имеющихся ядер и совершенно не зависит от «предыстории» этих ядер, от того, сколько они «прожили». Это означает, что радиоактивный распад не является результатом накопления каких-то изменений в ядрах, ядра не «стареют». Если бы распад ядер был результатом постепенных изменений, то имело бы значение, на какой стадии «жизни» мы «застали» совокупность ядер. Например, если выделить в лесу какое-то количество «молодых» деревьев и столько же «старых», то

ясно, что в последнем случае количество погибающих деревьев было бы больше, чем в первом, — скорость убывания была бы различна. Для ядер не существует «возраста»! Вероятность распада одинакова для всех ядер данного сорта и определяется постоянной распада λ. Ясно, что, чем больше вероятность распада, тем меньше период полураспада, что и выражается формулой (3).

Периоды полураспада различных радиоактивных элементов лежат в широком диапазоне времени: от миллиардных долей секунды до миллиардов лет [26, с. 150]. Так, например, полоний $^{212}_{84}Po$ имеет период полураспада $3 \cdot 10^{-7}$ с, а уран $^{238}_{92}U$ — $4{,}51 \cdot 10^{9}$ лет.

Тот факт, что радиоактивные ядра не имеют «возраста», не «стареют» (и поэтому некоторые из них могут «прожить» сколь угодно долго), не противоречит возможности охарактеризовать изотоп того или иного элемента средним временем жизни ($t_{ср}$). Расчеты показывают, что $t_{ср} = \frac{1}{\lambda} = \frac{T}{0{,}693}$.

Понятие среднего времени жизни, разумеется, применимо не к одному конкретному ядру, а к совокупности большого количества ядер. Нельзя сказать, сколько времени до распада просуществует данное ядро (так же, как нельзя предугадать длительность жизни того или иного биологического индивида, зная среднее время жизни всего вида).

3. СОСТАВ ЯДРА, ИЗОТОПЫ

Открытие нейтрона, а также исследование превращений элементарных частиц (в том числе нейтронов и протонов) утвердили протонно-нейтронную гипотезу строения ядер. Впервые эта модель была разработана независимо друг от друга Д. Д. Иваненко и В. Гейзенбергом.

Учащиеся должны научиться определять состав ядра по его атомному номеру Z и массовому числу A ($A = Z + N$), а также усвоить важное понятие современной физики — понятие об изотопах. Для изучения изотопного состава элементов применяется один из наиболее чувствительных современных приборов — масс-спектрограф. Количество вещества, необходимого для масс-спектрометрического анализа, составляет всего 10^{-6} г.

Масс-спектрометрическим исследованием установлено для 92 элементов периодической системы свыше 320 изотопов, из них 280 стабильных [26, с. 149]. С помощью же ядерных реакций удается искусственно получать новые радиоактивные изотопы практически для всех элементов (общее число известных изотопов превысило 1000).

Помимо изотопов, встречаются ядра различных элементов с одинаковым массовым числом A (т. е. с одинаковым числом нуклонов в ядре) — так называемые изобары. Изобарами, например, являются вольфрам-184 и осмий-184. Подобные примеры подчер-

кивают, что в основу систематизации элементов следует положить не массу ядер, а их заряд, который и определяет номер элемента в таблице Д. И. Менделеева.

Интересной темой внеурочной работы может служить вопрос об измерении масс изотопов и их разделении. Для современной промышленности разделение изотопов представляет трудную и очень важную задачу. Хорошо известным примером служит разделение изотопов урана в ядерной энергетике. В ядерных реакторах применяется обогащенный уран, в составе которого ^{238}U — 96,8%, а ^{235}U — 3,2% (в природном уране их соотношение: 99,2% и 0,7%). О масштабах производства, связанного с разделением изотопов, свидетельствует такой факт: в настоящее время мировая энергетика ежегодно потребляет 4000 т обогащенного урана, а к 2000 г. ожидается потребление 100 тыс. т обогащенного урана. Для его получения придется переработать 6 млн. т. руды. Другой пример — получение тяжелой воды из обычной (на каждые 6 тысяч обычных молекул воды приходится 1 тяжелая молекула).

4. ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ. ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ

Измерения масс ядер методами масс-спектрометрии позволяют оценить энергию связи ядер. Наиболее распространенное заблуждение учащихся — принимать энергию связи в качестве некоего запаса энергии ядер. На примерах из известных школьникам областей физики следует разъяснить, что энергия связи выделяется при образовании объекта из взаимодействующих (притягивающихся) частей[1]. К числу таких примеров относятся: образование жидкости из пара (выделяется теплота парообразования); образование кристалла из молекул пара или жидкости (выделяется теплота плавления); рекомбинация электрона и иона газа в газовом разряде (энергия связи выделяется, например, в виде кванта излучения) и др. Можно показать модельный опыт с двумя керамическими магнитами, насаженными на горизонтальный немагнитный стержень. Если магниты расположены так, что они притягиваются, то для их разъединения необходимо затратить «энергию связи». И наоборот, будучи разъединенными, они стремятся силами притяжения сблизиться; при этом энергия связи выделяется. Полезно обсудить, в каком виде в этом опыте выделяется «энергия связи». (О т в е т: при соударении кинетическая энергия превращается во внутреннюю, которая затем, в результате теплопередачи, передается окружающей среде.)

Прочность ядра свидетельствует о наличии больших сил *притяжения*. Следовательно, при образовании ядра из отдельных частиц энергия *выделяется*. Об этом свидетельствуют измерения масс

---

[1] См.: П о г о н е ц Г. К. Изучение энергии связи. — Физика в школе, 1977, № 2.

ядер (см. табл. 23.1). Для иллюстрации дефекта масс учащимся сообщают примеры ядерных масс, которые сравнивают с массами свободных нейтронов и протонов.

Таблица 23.1

Изотоп	Масса, а.е.м.	Энергия ядра, МэВ	Энергия связи, МэВ	Удельная энергия связи, МэВ/нуклон
$^{1}_{0}n$	1,0086544	939,5	0	
$^{1}_{1}H$	1,00782522	938,8	0	
$^{2}_{1}D$	2,01410219	1877	2,22452	1,112
$^{3}_{1}T$	3,01604940	2809	8,482	2,827
$^{3}_{2}He$	3,01604994	2809	7,718	2,574
$^{4}_{2}He$	4,00260361	3728	28,29	7,074
$^{5}_{3}Li$	5,012541	4669	26,33	5,266
$^{11}_{6}C$	11,011431	10 260	73,44	6,676
$^{16}_{8}O$	15,99491494	14 880	127,62	7,976

Полезно показать график зависимости от массового числа энергии ядра, приходящейся на один нуклон (рис. 23.1, *а*). Он подчеркивает, что нуклоны ядер «сидят» в потенциальной яме, подобно электронам атомов. Учащиеся наглядно видят, что нуклоны ядер со средними массовыми числами (железо, никель и др.) «сидят» в более глубокой «яме», чем нуклоны тяжелых ядер.

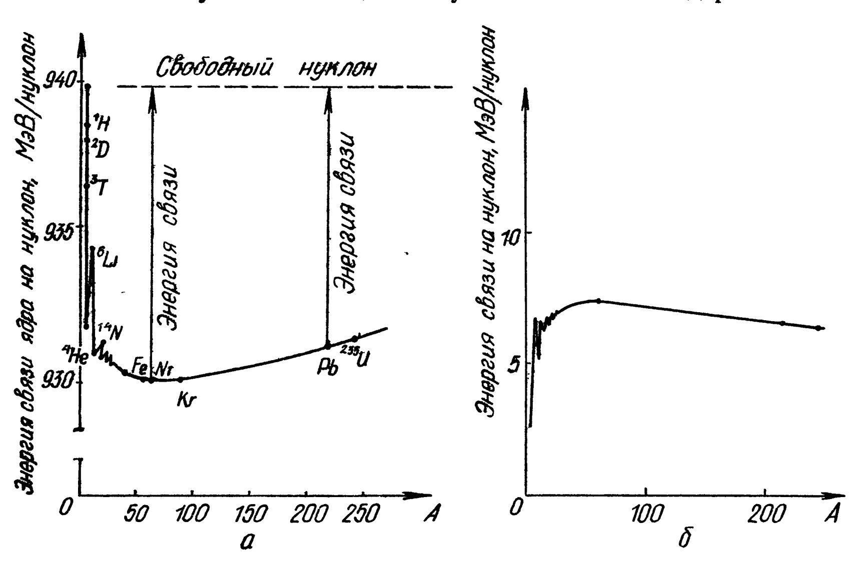


Рис. 23.1

С помощью графика удобно объяснить и сущность понятия «энергия связи»: для освобождения нуклона из ядра необходима дополнительная энергия (она аналогична энергии ионизации атома). Вертикальные стрелки на рисунке 23.1, *а* показывают удельную энергию связи для ряда ядер.

Учащиеся могут самостоятельно начертить, пользуясь рисунком 23.1, *а*, график зависимости удельной энергии связи от массового числа (рис. 23.1, *б*).

Из анализа кривой нужно сделать два важных вывода: 1) она имеет максимум, соответствующий ядрам средней части таблицы элементов (что обусловливает два возможных пути освобождения ядерной энергии); 2) для большинства ядер (кроме самых легких) удельная энергия связи приблизительно одинакова ($\approx$ 8 МэВ), что обусловлено характером *ядерных сил*, а именно присущим им свойством *насыщения*.

Далее уместно рассмотреть с учащимися некоторые свойства ядерных сил. Можно назвать следующие свойства:

1) Ядерные силы — особые силы *притяжения* между нуклонами, значительно превосходящие электромагнитные взаимодействия. Действительно, несмотря на электрическое отталкивание протонов, нуклоны удерживаются в ядре ядерным взаимодействием.

2) Ядерные силы — короткодействующие (они убывают с расстоянием по закону $e^{-\alpha r}$, в то время как электрическая сила убывает по более слабому закону $\frac{1}{r^2}$). На расстоянии, превышающем 10^{-12} см (размер ядра), ядерные силы не действуют.

3) Ядерным силам присуще насыщение. Это свойство похоже на валентность химических связей. Благодаря этому свойству каждый нуклон взаимодействует лишь с несколькими соседями, а не со всеми нуклонами ядра. Учащиеся легко поймут, что если бы все нуклоны взаимодействовали друг с другом, то энергия связи ядра была бы пропорциональна A, чего нет на самом деле: энергия связи примерно одинакова для всех ядер (кроме самых легких).

4) Ядерные силы не зависят от электрического заряда нуклонов. Это видно, например, из того, что энергия связи трития ($^3_1$T) и изотопа гелия $^3_2$He примерно одинакова (см. табл. 23.1).

В заключение следует сообщить учащимся, что природа ядерного взаимодействия — одна из фундаментальных проблем современной физики. Она исследуется новым направлением естествознания — физикой элементарных частиц.

5. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ. ИСКУССТВЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ

При всех ядерных превращениях сохраняется число нуклонов и электрический заряд. Учащиеся должны научиться применять эти законы сохранения для определения характера ядерных

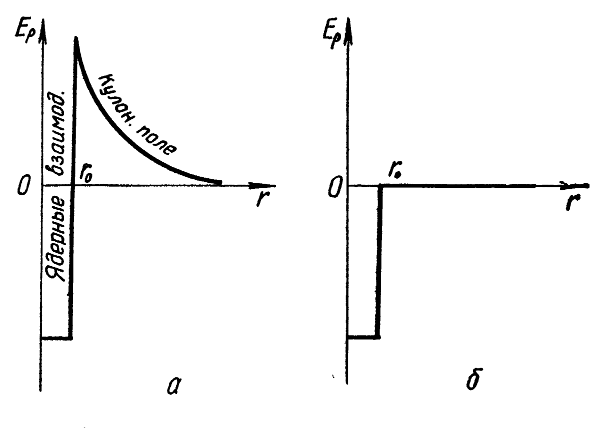


Рис. 23.2

реакций. Здесь полезны упражнения по написанию схемы ядерных реакций с определением одного из неизвестных ядер [см.: 29, № 1317—1319].

Рассматривая примеры ядерных превращений под действием различных частиц, нужно остановиться на различии взаимодействия с ядрами заряженных частиц и нейтронов. Это удобно сделать с помощью графика зависимости потенциальной энергии взаимодействия ядра с частицей от расстояния. Для системы «ядро — заряженная частица (протон, α-частица, положительно заряженный ион)» кривая имеет вид, показанный на рисунке 23.2, *а*. Положительно заряженная частица отталкивается ядром, поэтому для приближения к ядру ей необходимо преодолеть кулоновский барьер. Для этого частица должна иметь соответствующую кинетическую энергию. В ряде случаев такая энергия сообщается в ускорителях заряженных частиц. На расстоянии, равном r_0, начинают действовать ядерные силы притяжения и частица как бы падает в «яму» — захватывается ядром.

По-иному выглядит потенциальная кривая для нейтрона (рис. 23.2, *б*). Ввиду отсутствия заряда у нейтрона кулоновский барьер отсутствует, поэтому даже медленные нейтроны могут быть захвачены ядром и вызвать ядерные превращения. Большое число ядерных реакций осуществляется в ядерных реакторах, где получают мощные потоки нейтронов.

В результате поглощения частицы ядром образуется так называемое «составное ядро», имеющее избыток внутренней энергии (это энергия связи и кинетическая энергия захваченной частицы; другими словами, это энергия «падения в яму».) Такое ядро оказывается нестабильным и превращается в другое ядро, выбрасывая какие-либо частицы.

Большой интерес у учащихся вызывают ядерные реакции, в

которых получаются трансурановые элементы[1]. Примерами таких ядерных реакций могут быть следующие:

1) получение элемента курчатовия (1964, Дубна):

$$^{22}_{10}Ne + ^{242}_{94}Pu \rightarrow ^{260}_{104}Ku + 4n;$$

2) получение элемента 106 (нет названия; 1974, Дубна):

$$^{54}_{24}Cr + ^{207}_{82}Pb \rightarrow ^{259}106 + 2n.$$

В качестве примеров реакций под действием нейтронов могут быть приведены реакции, применяемые для воспроизводства ядерного горючего (гл. 24), а также реакция деления.

Ядра, получающиеся в ядерных реакциях, часто оказываются радиоактивными. Следует дать учащимся элементарное разъяснение причин неустойчивости таких ядер. Стабильность ядер обеспечивается определенным соотношением между числом протонов и нейтронов. При заданном A существует оптимальное соотношение между числом протонов и нейтронов, при котором ядро оказывается максимально устойчивым. Избыток протонов уменьшает энергию связи благодаря кулоновскому отталкиванию. Избыток же нейтронов приводит к увеличению размеров ядра, к его «разбуханию» и, ввиду короткодействия ядерных сил, к уменьшению энергии связи.

Ядра с избыточным содержанием протонов часто оказываются β^+-радиоактивными, ядра же с избытком нейтронов — β^--радиоактивными. Воздействуя на стабильные ядра частицами, можно изменять их состав и вызывать искусственную радиоактивность.

При рассмотрении ядерных реакций полезно предварительно сообщить (в осведомительном плане) сведения о возможности превращения в ядрах нуклонов друг в друга с образованием электрона или позитрона. Эти сведения полезны и при рассмотрении правил смещения при радиоактивных распадах.

6. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ВЫХОД ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

Помимо сохранения заряда и числа нуклонов, в ядерных реакциях выполняется, конечно, и закон сохранения энергии. Если массы покоя частиц до реакции m_1 и m_2, а после реакции m_3 и m_4, то закон сохранения энергии можно записать так:

$$m_1c^2 + m_2c^2 = m_3c^2 + m_4c^2 + W, \qquad (1)$$

где W — *энергия реакции.*

Для расчетов удобно массу сразу выражать в энергетических единицах (1 а.е.м. соответствует 931 МэВ). Энергия реакции может быть как положительной, так и отрицательной. В последнем случае для того чтобы произошла реакция, необходимо предвари-

[1] См.: Флеров Г. Н., Ильинов А. С. На пути к сверхэлементам. М., 1974.

тельно сообщить частицам добавочную кинетическую энергию. Наиболее важные для ядерной энергетики реакции с положительной (т. е. выделяющейся) энергией реакции — это реакция деления и термоядерная реакция синтеза.

Непосредственно пользоваться уравнением (1) неудобно, поскольку учащиеся, как правило, в качестве исходных данных располагают удельной энергией связи и массовыми числами. Поэтому рассчитывать энергию реакции они могут следующим образом. Все ядра рассматриваются как результат объединения соответствующего числа свободных нуклонов. Определяется энергия, которая должна при этом выделиться. Сравниваются энергии связи исходных и конечных ядер и находится их разность. Это и есть искомая энергия реакции W.

Рассмотрим в качестве примера следующую задачу:

Найти энергию реакции синтеза ядер гелия из ядер дейтерия и трития.

Решение. Пусть реакция протекает по схеме:

$$^2_1\mathrm{D} + {}^3_1\mathrm{T} \rightarrow {}^1_2\mathrm{He} + n.$$

Пользуясь таблицей 23.1 или графиком удельной энергии связи [12, рис. 268], учащиеся найдут, что при образовании из отдельных нуклонов ядер $^2_1\mathrm{D}$ выделяется 2,2 МэВ; ядер $^3_1\mathrm{T}$ — 8,5 МэВ; ядер $^4_2\mathrm{He}$ — 28,3 МэВ.

Следовательно, при образовании $^4_2\mathrm{He}$ из «готовых» ядер $^2_1\mathrm{D}$ и $^3_1\mathrm{T}$ выделится 28,3 МэВ — (8,5 + 2,2) МэВ = 17,6 МэВ. В расчете на один нуклон получится 3,5 МэВ/нуклон.

ГЛАВА 24

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГИЯ, ЕЕ ПОЛУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

Данная тема не только раскрывает принципы ядерной энергетики, но и имеет большое воспитательное значение, так как дает возможность осветить одну из самых ярких страниц истории советской науки и техники, раскрыть образ замечательного советского ученого-патриота, организатора отечественной атомной науки и техники И. В. Курчатова [31].

Поурочное планирование темы может быть таким:

1-й урок. Реакция деления ядер.

2-й урок. Цепная реакция деления. Ядерный реактор. АЭС.

3-й урок. Успехи и перспективы развития ядерной энергетики в СССР.

4-й и 5-й уроки. Получение радиоактивных изотопов и их использование в промышленности, сельском хозяйстве, науке и медицине. Понятие о дозе излучения и биологической защите.

1. РЕАКЦИЯ ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР

Кратко рассмотрев историю открытия реакции деления урана, устанавливаем энергетический выход этой реакции (более 200 МэВ на ядро!). Сравниваем этот результат с энергией, выделяемой при сжигании топлива. Последняя сравнима с энергией связи и валентных электронов атома и составляет десятки электрон-вольт. Отсюда вывод: реакция деления ядра в миллионы раз более эффективна, чем реакция сжигания топлива.

Далее объясняем механизм деления на основании капельной модели ядра. Сообщаем, что Я. И. Френкель (СССР) и Н. Бор (Дания) разработали теорию деления ядра на основе представления о ядре как о жидкой заряженной капле.

Приводим следующие доводы в обоснование капельной модели:

1. Нуклоны в ядре подвижны, как и молекулы жидкости.

2. Ядерные силы короткодействующие, подобно силам молекулярного взаимодействия.

3. При увеличении числа молекул растет объем капли, но ее плотность не изменяется; подобным свойством обладают и ядра.

4. Энергия, дополнительно сообщенная ядру, может статистически распределяться между всеми нуклонами, подобно тому как при нагревании жидкости энергия распределяется между всеми ее молекулами.

Внедрение нейтрона в ядро сопровождается выделением энергии связи ($\approx$7 МэВ), а также кинетической энергии нейтрона. Эта избыточная энергия, распределяясь между всеми нуклонами ядра, приводит к его деформации. Ядро вытягивается, приобретает гантелевидную форму и разрывается на части силами электростатического отталкивания. По аналогии с делением биологической клетки это явление назвали «делением ядра».

Деление ядра приводит к выделению энергии в виде кинетической энергии осколков, а также энергии γ-излучения и энергии вторичных нейтронов. Полезно привести баланс энергии при делении ядра [26]. Подчеркиваем, что основной вклад в этот баланс выделяемой при делении ядра энергии вносит энергия электрического отталкивания.

Важнейшей особенностью деления тяжелых ядер является испускание вторичных нейтронов. Приводим учащимся следующие разъяснения. Для стабильных ядер существует оптимальное соотношение между числом нейтронов и протонов. Для легких ядер отношение $\frac{N}{Z}$ равно единице, для ядер средней части таблицы Д. И. Менделеева—1,4—1,5 (в этом учащиеся убеждаются сами на примере какого-либо ядра), для тяжелых же ядер оптимальное соотношение равно 1,6. В силу этого осколки оказываются перегруженными нейтронами, избыток которых и испускается. По этой же причине продукты деления являются радиоактивными. Эти сведения помогают учащимся понять, почему ядра различных элементов, будучи облученными нейтронами, становятся радиоактивными.

2. ЦЕПНАЯ РЕАКЦИЯ ДЕЛЕНИЯ. ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР

В природе имеется один сорт ядер, способных развить цепную реакцию — изотоп урана ^{235}U. Но в урановой руде его содержится меньше 0,7%. Остальные расщепляющиеся вещества получаются искусственно. Так подводим школьников к проблеме осуществления цепной реакции в уране, содержащем подавляющее количество нерасщепляющихся, но поглощающих нейтроны ядер изотопа урана ^{238}U. Рассматривая различие в свойствах изотопов урана, разъясняем необходимость замедления нейтронов в случае слабо обогащенного урана.

Далее изучается принцип действия ядерного реактора. Ядерный реактор строится таким образом, чтобы процесс замедления нейтронов осуществлялся вне ядерного горючего. Это позволяет избежать нежелательного поглощения нейтронов ядрами ^{238}U. Двигаясь в замедлителе (вода, графит), нейтроны становятся тепловыми и, попадая в урановые стержни, с большой вероятностью захватываются ядрами делящегося вещества.

Разъясняя принцип управления цепным процессом с помощью стержней из эффективных поглотителей нейтронов (например, бора), отмечаем роль запаздывающих нейтронов. Дело в том, что автоматические устройства реактора должны, в случае повышения уровня размножения нейтронов выше безопасной нормы, успеть ввести поглотители в активную зону реактора. Но всякие механические (и не только механические!) устройства обладают некоторой инерционностью. Если бы нейтроны при делении мгновенно испускались, то инерционность регулирующих устройств была бы очень опасной и осуществить управление цепным процессом было бы практически невозможно. Но положение облегчается тем, что вторичные нейтроны испускаются не мгновенно, а с некоторым запаздыванием.

Большой интерес у учащихся вызывает вопрос о воспроизводстве ядерного горючего в реакторах-размножителях. Для получения ядерного расщепляющегося материала применяются две реакции под действием быстрых нейтронов. В одной из них ядра урана ^{238}U, захватив нейтрон, испускают последовательно две β-частицы и превращаются в изотоп плутония $^{239}_{94}Pu$, являющегося отличным ядерным горючим. В другой реакции изотоп тория $^{239}_{90}Th$ превращается в изотоп урана $^{233}_{92}U$, также хорошо расщепляющегося материала. Схемы реакций учащиеся могут написать, зная исходные и конечные продукты:

$$^{238}_{92}U + n \rightarrow {}^{239}_{92}U \xrightarrow[23\ \text{мин}]{\beta^-} {}^{239}_{93}Np \xrightarrow[2,3\ \text{дня}]{\beta^-} {}^{239}_{94}Pu;$$

$$^{232}_{90}Th + n \rightarrow {}^{233}_{90}Th \xrightarrow[23,5\ \text{мин}]{\beta^-} {}^{233}_{91}Pa \xrightarrow[27,4\ \text{дня}]{\beta^-} {}^{233}_{92}U.$$

Реактор-размножитель на быстрых нейтронах работает так. В его центральной части имеется «активная зона», в которой происходит цепная реакция в веществе, значительно (свыше 20%)

обогащенном расщепляющимися ядрами изотопов урана-235(233) или плутония-239. Активная зона выполнена в виде сплошных или полых цилиндров и окружена пластинами из природного урана или тория (очищенных от посторонних примесей до очень высокой степени). Последние образуют «зону воспроизводства». В таком реакторе нет замедлителя, поскольку замедление нейтронов уменьшает вероятность захвата ураном-238 или торием. Ядра же урана-235 (или другие расщепляющиеся ядра) хорошо делятся как быстрыми, так и медленными нейтронами. Благодаря их сравнительно большому количеству цепной процесс протекает, несмотря на то что в среднем 1,5 нейтрона (из 2,5) используются для воспроизводства. Отсутствие замедлителя делает реактор на быстрых нейтронах компактным. В качестве теплоносителя может применяться жидкий металл (например, натрий, точка кипения которого 840°С). Повышение температуры, как известно учащимся, увеличивает КПД энергетических установок.

В нашей стране достигнуты большие успехи в создании промышленных быстрых реакторов[1]. В 1973 г. вступила в строй АЭС в г. Шевченко, тепловая мощность которой 1000 МВт. Станция вырабатывает электроэнергию и снабжает паром крупнейший в мире завод по опреснению морской воды. На Белоярской АЭС им И.В.Курчатова вблизи Свердловска сооружается реактор БН-600 (электрическая мощность 600 МВт) [см.: 26, с. 331].

3. УСПЕХИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В СССР

В данной теме необходимо раскрыть значение атомной энергетики в решении энергетических проблем настоящего и будущего. Большое воспитательное значение приобретает освещение успехов нашей страны — родины первых мирных ядерных энергетических установок. Рассказывая учащимся об истории создания нашей ядерной индустрии, следует подчеркнуть, что наша наука самостоятельно решала все научные проблемы, связанные с использованием ядерной энергии. В условиях полной засекреченности за рубежом атомных работ, в тяжелые послевоенные годы СССР сумел выйти на самые передовые рубежи науки и техники. Мы гордимся тем, что первая в мире атомная электростанция построена у нас и 27 июня 1954 г. дала ток. Ее мощность равна всего 5 МВт, но значение ее огромно. «Пуск первой атомной станции в СССР создал перелом в сознании людей и сделал идею о возможности мирного использования атомной энергии достоянием всего человечества. Он сделал ее мощной социальной силой»[2].

По плану 10-й пятилетки должны быть введены в строй атомные

---

[1] См.: Синев Н. Быстрые реакторы — вот завтрашний день атомной энергетики. — Техника — молодежи, 1976, № 5.

[2] Блохинцев Д. И. Рождение мирного атома. М., 1977.

электростанции общей мощностью 13—15 млн. кВт. Ожидается, что к концу XX столетия мощность АЭС составит не менее 50 % мощности, даваемой всеми электростанциями.

Помимо раскрытия энергетической стороны, следует познакомить учащихся и с другими сторонами ядерной энергетической проблемы: экономической, с задачей охраны окружающей среды, с возможностями рационального использования сырьевых ресурсов[1].

Среди важнейших научно-технических проблем современности стоит задача овладения управляемой термоядерной реакцией. Существует несколько проектов достижения необходимых для реакции параметров вещества. В СССР разработаны получившие признание во всем мире установки «Токамак», в которых электрические разряды разогревают плазму до миллионов градусов. В последнее время в установке «Токамак-10» достигнута температура 13 млн. градусов. В ней уже наблюдаются интенсивные ядерные процессы (правда, еще не термоядерные).

4. ПОЛУЧЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ, СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ, НАУКЕ И МЕДИЦИНЕ. ПОНЯТИЕ О ДОЗЕ ИЗЛУЧЕНИЯ И БИОЛОГИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЕ

При рассмотрении примеров применения радиоизотопов обращают внимание учащихся на их замечательные свойства: постоянство периода полураспада и его независимость от физических и химических условий существования излучающих ядер; высокую энергию испускаемых корпускул и возможность регистрации отдельных случаев распада; большую чувствительность регистрирующих приборов и возможность обнаружения небольшого количества радиоизотопов среди аналогичных нерадиоактивных веществ; высокую проникающую способность нейтронного и γ-излучений; характерные для ряда изотопов периоды полураспада и энергетический спектр излучений; возможность индуцирования искусственной радиоактивности; непрерывное и почти не ослабевающее выделение энергии радиоизотопами с большим периодом полураспада. Эти особенности радиоизотопов и делают возможными их многообразные применения в науке и технике.

Целесообразно вопрос о применении радиоизотопов сделать темой обсуждения на учебной конференции. Тематика сообщений учащихся может быть следующей:

1. Получение радиоизотопов.
2. Метод меченых атомов и его применение.
3. Радиоактивные «часы» в геологии и археологии.

---

[1] См.: Ядерная энергетика и внешняя среда. М., 1977.

4. Активационный анализ.
5. Радиоизотопы в медицине.
6. Радиоизотопы в технологических процессах.
7. Радиоизотопы в сельском хозяйстве.
8. Трансурановые элементы и перспектива их применения.

Для подготовки сообщений учащимися могут быть использованы примеры, приведенные в книгах [78; 86; 94; 99].

Ядерная энергия, как и электрическая, является величайшим достижением науки, но ее применение требует определенной грамотности всех людей. Ядерные излучения, проходя через вещества, вызывают ионизацию атомов, что, по-видимому, приводит к разрушению клеток или торможению их размножения. Важно отметить, что действие излучения на биологический объект суммируется, поэтому имеет значение как интенсивность излучения, так и длительность его воздействия. Поглощенная доза излучения измеряется в особых единицах — джоулях на килограмм. 1 Дж/кг— это такая доза поглощенного ионизирующего излучения, при которой облученному веществу массой 1 кг передается энергия излучения 1 Дж.

Понятно, что, чем большей является поглощенная доза, тем больше ионизаций произведено излучением в веществе. Естественный фон излучения (космические лучи) обусловливает дозу $4 \cdot 10^{-4}$ Дж/кг в год. За время жизни (70 лет) человек получает $3 \cdot 10^{-2}$ Дж/кг. Доза в 2 Дж/кг вызывает лучевую болезнь, а доза в 4 Дж/кг — смертельный исход. В нашей стране по санитарным нормам установлена предельно допустимая годовая доза для населения в $5 \cdot 10^{-4}$ Дж/кг.

По данной теме желательно показать учащимся фрагмент кинофильма «Атом и атомное ядро», а также кинофильм «Строение атома и атомного ядра. Атомная энергия».

ГЛАВА 25

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Основное содержание темы, которая изучается в ознакомительном плане, видно из следующего примерного поурочного планирования:

1-й урок. Что такое элементарная частица? Свойства элементарных частиц, методы их изучения.

2-й урок. Открытие позитрона. Античастицы (на примере позитрона).

3-й урок. Распад нейтрона. Открытие нейтрино. Превращение частиц вещества в кванты поля и обратные превращения.

1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦАХ. ПОНЯТИЕ ЭЛЕМЕНТАРНОСТИ

Понятие «элементарность» изменяется по мере углубления знаний, устанавливаемых наукой о строении вещества, материи на том или ином этапе ее развития. Развитие физики привело к открытию сложной структуры ядра атома, частиц, из которых оно состоит, названных «элементарными частицами», в том смысле, что еще не определена их структура. Современной физике известно более 200 элементарных частиц и возбужденных состояний. Продолжается открытие новых элементарных частиц. В настоящее время предпринимается попытка ответить на вопрос: имеются ли субчастицы, т. е. можно ли считать, что известные элементарные частицы состоят из других, более мелких частиц?

Структура элементарных частиц изучается методом столкновения частиц высоких энергий, так как увеличение энергии дает возможность исследовать явления и процессы, происходящие на малых расстояниях.

Сами частицы обнаруживаются по их взаимодействию с веществом в конденсированном состоянии или по взаимодействию с другими частицами с помощью явлений, которыми сопровождается это взаимодействие (треки частиц в камере Вильсона, импульсы разрядов в счетчиках Гейгера — Мюллера, следы в толстослойных фотоэмульсиях и т. д.).

В настоящее время твердо установлено, что электроны, протоны, нейтроны и другие микрообъекты обладают волновыми свойствами, т. е. каждая частица представляет собой единство волновых и корпускулярных свойств. Отсюда следует вывод, что с элементарными частицами нельзя сопоставлять определенный зримый образ. В зависимости от условий на передний план выступают либо волновые, либо корпускулярные свойства.

2. ОТКРЫТИЕ ПОЗИТРОНА. ПОНЯТИЕ ОБ АНТИЧАСТИЦАХ

Вопрос об открытии позитрона и о понятии «античастица» достаточно полно изложен в учебнике «Физика-10». Поэтому материал этот может быть проработан на уроке учащимися самостоятельно по учебнику [12, § 148]. Для того чтобы эта работа носила более целенаправленный характер, перед началом ее полезно предложить учащимся следующие вопросы, ответы на которые они должны получить в результате самостоятельной работы с учебником:

1. Кем из ученых и когда было предсказано существование позитрона — античастицы электрона?
2. Как был открыт позитрон? По каким признакам было установлено, что эта частица имеет примерно такую же массу, как электрон, и заряд, противоположный по знаку заряду электрона?
3. Какое явление зафиксировано на фотографии, изображенной на рисунке 276 учебника?
4. Какие частицы называют античастицами?
5. Какое явление получило название аннигиляции? В чем оно заключается?
6. Как называется первая открытая в истории науки античастица?

7. Какие частицы аннигилируют?

8. Что такое антигелий? Когда и где он был впервые получен? Какова его структура? Изобразите схематично атом гелия и атом антигелия.

9. Почему при аннигиляции частиц и античастиц, а также атомов вещества и антивещества выделяется большое количество энергии?

10. Запишите реакции аннигиляции и рождения электронно-позитронной пары.

По этим вопросам проводится собеседование после самостоятельной работы учащихся с учебником.

Необходимо также подчеркнуть, что в настоящее время установлено, что рождение пар — частица и античастица — и их аннигиляция не составляют монополии электронов и позитронов.

Можно привести диаграмму Фейнмана, на которой представлен схематично процесс аннигилиции электронно-позитронной пары, возникновения γ-фотона, превращение последнего в ρ-мезон и два π-мезона (π^+ и π^--мезоны; рис. 25.1). Можно отметить, что мезонами называют частицы, занимающие по массе промежуточное положение между легкими частицами (лептонами) и тяжелыми частицами (нуклонами и гиперонами), что в настоящее время известно по меньшей мере 27 различных мезонных состояний. В таблице на с. 296 учебника «Физика-10» представлено 10 мезонных состояний.

3. РАСПАД НЕЙТРОНА. ОТКРЫТИЕ НЕЙТРИНО

Чтобы понять логику суждений ученых, предсказавших существование нейтрино, можно предложить учащимся самим высказать свои предположения о явлениях, которые происходят в ядре при β-распаде.

Далее учитель обращает внимание учащихся на факт, объяснение которого вызвало у физиков большие затруднения. Заключается он в том, что совершенно тождественные ядра испускают электроны различной энергии. При этом вновь образующиеся ядра совершенно одинаковы, независимо от того, какова энергия испущенного электрона. Это противоречит закону сохранения энергии. Определение импульсов электрона и ядра, получающихся при распаде, показало, что не выполняется и закон сохранения импульса. Таким образом было обнаружено кажущееся нарушение фундаментальных физических законов.

Швейцарский физик В. Паули (1931) высказал предположение, что вместе с протоном и электроном при распаде нейтрона рождается какая-то неизвестная еще частица—«невидимка», которая уносит с собой недостающие импульс и энергию. «Невидимкой» частица была названа потому, что она не регистрируется приборами, так как не имеет массы покоя (масса покоя ее оказалась равной нулю). Она не несет и электри-

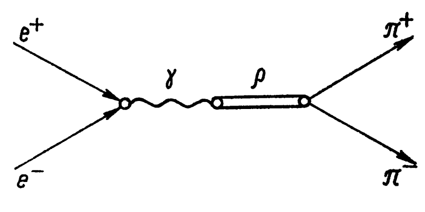


Рис. 25.1

ческого заряда, поэтому не вызывает эффектов, по которым можно судить о появлении частицы (люминесцентное свечение, почернение фотоэмульсии, оставление треков в камере Вильсона и т. д.), т. е. она не способна производить ионизацию атомов. Эта гипотетическая частица была названа итальянским физиком Энрико Ферми «нейтрино», что означает в переводе на русский язык «нейтрончик».

Более четверти века нейтрино существовало в физике на правах гипотетической частицы, ее никак не удавалось обнаружить, но отказ от нее означал бы отказ от законов сохранения энергии и импульса. Паули объяснял неудачи экспериментального обнаружения нейтрино их слабым взаимодействием. Именно он предположил, что масса покоя нейтрино равна нулю и поэтому она движется со скоростью света. И все же нейтрино удалось обнаружить, экпериментально подтвердить ее существование. Эти эксперименты были поставлены в 1956 г. в США. Эксперимент проводился физиками К. Райнесом и Ф. Коуэном. Описание эксперимента имеется в учебнике «Физика-10» (§ 149). Нужно подчеркнуть, что этими опытами было показано, что недостающие энергию и импульс при β-распаде ядра уносит с собой антинейтрино, и тем самым еще раз была подтверждена справедливость законов сохранения импульса и энергии.

Желательно обратить внимание учащихся на то, что роль нейтрино не сводится только к объяснению явления распада нейтрона. Без введения понятий «нейтрино» и «антинейтрино» невозможно было объяснить многие другие превращения элементарных частиц, в которых наблюдается кажущееся «нарушение» законов сохранения, например распад π^+-мезона:

$$\pi^+ \approx e^+ + \nu$$

и распад μ-мезона:

$$\mu^+ \approx e^+ + \nu_\mu + \nu_e,$$

$$\mu^- \approx e^- + \nu + \bar{\nu}.$$

Общее представление о классификации элементарных частиц можно дать на основе анализа таблицы на с. 296 учебника «Физика-10», где представлены стабильные и относительно стабильные частицы в порядке возрастания их массы покоя. При анализе таблицы надо обратить внимание учеников на то, что каждой частице соответствует своя античастица, имеющая с частицей или противоположный электрический заряд или спин (собственный момент импульса частицы).

В заключение изучения темы необходимо перечислить основные свойства элементарных частиц:

1. Наличие массы. Масса проявляется во взаимодействиях, в которых участвует частица. Способность частицы к определенным взаимодействиям — самая важная ее характеристика. Массой обла-

дают все частицы, в то время как другие величины у одних частиц имеются, а у других — нет. Именно по массе частицы объединены в определенные группы: легкие, средние и тяжелые. Фотон и нейтрино не имеют массы покоя, но имеют массу при движении. В покое они не существуют.

2. Взаимопревращаемость частиц, способность к взаимодействиям.

3. Наличие энергии, импульса, спина.

4. Единство волновых и корпускулярных свойств.

5. При всех взаимодействиях и взаимопревращениях частиц соблюдаются законы сохранения электрического заряда, импульса, энергии; для барионов — закон сохранения барионного заряда.

6. Типы взаимодействия элементарных частиц: электромагнитное, гравитационное, сильное (время сильного взаимодействия — 10^{-22} — 10^{-23} с), слабое (время слабого взаимодействия — 10^{-8} — 10^{-10} с). Электромагнитное взаимодействие слабее сильного в 10^2 — 10^3 раз.

Для закрепления знания законов, которым подчиняется взаимодействие частиц, их распад и взаимопревращения, необходимо организовать выполнение учащимися хотя бы небольшого количества упражнений, имеющихся в учебнике «Физика-10» (с. 297), желательно предложить учащимся с точки зрения этих законов проверить все ранее записанные реакции.

Можно также познакомить учащихся с гипотезой о кварках, согласно которой многие частицы (мезоны, гипероны) построены из шести фундаментальных частиц — кварков. Согласно этой гипотезе кварки должны иметь дробный заряд. Хотя кварки еще не обнаружены, но на основе гипотезы о кварках предсказано существование частицы омега-минус-гиперон, которая экспериментально обнаружена. Эксперимент подтвердил все ее свойства, предсказанные теоретически.

В настоящее время проводятся исследования, направленные на выявление структуры нуклонов. Эти исследования ведутся двумя методами: а) упругого рассеяния мезонов (пионов) с энергией порядка 7 ГэВ на протонах; б) упругого рассеяния быстрых электронов на протонах и нейтронах.

На внеклассных и факультативных занятиях можно познакомить учащихся с моделью нуклона. Желательно напомнить учащимся, что изучение структуры элементарных частиц требует столкновений частиц высоких энергий. Для получения высоких энергий нужны ускорители элементарных частиц. В нашей стране самым крупным ускорителем протонов является Серпуховский синхрофазотрон [26, с. 405].

Полезно также сообщить о создании установок для получения встречных пучков электронов и позитронов, позволяющих при меньших энергетических затратах получать частицы высоких энергий.

ЛИТЕРАТУРА

Учебники и учебные пособия

1. Базаров И. П. Термодинамика. М., 1976.

2. Буховцев Б. Б., Климонтович Ю. Л., Мякишев Г. Я. Физика. Учебное пособие для 9 класса средней школы. М., Просвещение, 1979.

3. Гершензон Е. М., Малов Н. Н. Курс общей физики. Электричество и магнетизм. М., Просвещение, 1980.

4. Иванов Б. Н. Принципы современной физики. М., Наука, 1973.

5. Кабардин О. Ф., Кабардина С. И., Шефер Н. И. Факультативный курс физики. 9 класс. М., Просвещение, 1978.

6. Кабардин О. Ф., Орлов В. А., Шефер Н. И. Факультативный курс физики. 10 класс. М., Просвещение, 1978.

7. Купер Л. Физика для всех. Пер. с англ. М., Мир, 1973, т. I.

8. Ландау Л. Д., Китайгородский А. И. Физика для всех. М., Наука, 1974.

9. Ландсберг Г. С. Оптика. М., Наука, 1976.

10. Малов Н. Н. Основы теории колебаний. М., Просвещение, 1971.

11. Мандельштам Л. И. Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике. М., Наука, 1972.

12. Мякишев Г. Я., Буховцев Б. Б. Физика. Учебник для 10 класса средней школы. М., Просвещение, 1979.

13. Перышкин А. В., Родина Н. А. Физика. Учебник для 6—7 классов средней школы, М., Просвещение, 1979.

14. Перышкин А. В. Курс физики. Учебник для средней школы, ч. 2, 3. М., Просвещение, 1970, 1971.

15. Роджерс Э. Физика для любознательных. Пер. с англ. М., Мир, 1972, т. I.

16. Савельев И. В. Курс общей физики. Наука, 1970—1973, т. I—III.

17. Факультативный курс физики. 9 класс / Под ред. А. В. Перышкина и С. Е. Каменецкого. М., Просвещение, 1976.

18. Физика. Пер. с англ. / Под ред. А. С. Ахматова. М., Наука, 1972, 1974, ч. 3, 4.

19. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Пер. с англ. М., Мир, 1965—1967, вып. 3—9.

20. Шпольский Э. В. Атомная физика. М., Наука, 1974, т. 1—2.

21. Элементарный учебник физики / Под ред. Г. С. Ландсберга. М., Наука, 1970, 1972, т. 2, 3.

22. Эллиот Л., Уилкокс У. Физика. Пер. с англ. М., Наука, 1967.

Задачники. Дидактические материалы. Справочники

23. Балаш В. А. Задачи по физике и методы их решения. М., Просвещение, 1974.

24. Демкович В. П., Демкович Л. П. Сборник задач по физике для 8—10 классов средней школы. М., Просвещение, 1974.
25. Енохович А. С. Справочник по физике. М., Просвещение, 1978.
26. Енохович А. С. Справочник по физике и технике. М., Просвещение, 1976.
27. Каменецкий С. Е., Орехов В. П. Методика решения задач по физике в средней школе. М., Просвещение, 1974.
28. Разумовский В. Г. Творческие задачи по физике в средней школе. М., Просвещение, 1966.
29. Рымкевич А. П., Рымкевич П. А. Сборник задач по физике для 8—10 классов средней школы. М., Просвещение, 1978.
30. Физический энциклопедический словарь. М., Советская энциклопедия, 1960—1966, т. 1—5.

История физики

31. Асташенков Т. Т. Курчатов. М., Молодая гвардия, 1968.
32. Белькинд Л. Д. Андре Мари Ампер. М., Наука, 1968.
33. Бренев И. В. Начало радиотехники в России. М., Советское радио, 1970.
34. Гуло Д. Д. Н. А. Умов. М., Просвещение, 1977.
35. Елисеев А. А. Б. С. Якоби. М., Просвещение, 1978.
36. Карцев В. П. Максвелл. М., Молодая гвардия, 1974.
37. Клаус Е. М., Франкфурт У. И., Френк А. М. Нильс Бор. М., Наука, 1977.
38. Кудрявцев П. С. История физики. М., Просвещение, 1956, 1971, т. 1—3.
39. Кудрявцев П. С. Курс истории физики. М., Просвещение, 1974.
40. Кудрявцев П. С. Фарадей. М., Просвещение, 1969.
41. Кудрявцев П. С., Конфедератов И. Я. История физики и техники. М., Просвещение, 1965.
42. Липсон Г. Великие эксперименты в физике. Пер. с англ. М., Мир, 1972.
43. Льоцци М. История физики. Пер. с итал., М., Мир, 1970.
44. Основатели советской физики. М., Просвещение, 1970.
45. Попов А. С. в характеристиках и воспоминаниях современников. М.—Л., 1958.
46. Развитие физики в России / Под. ред. А. С. Предводителева и Б. И. Спасского. М., Просвещение, 1970.
47. Резерфорд Э. о физике XX века. М., Знание, 1971.
48. Савелова Е. В. Вопросы истории и техники в курсе физики средней школы. М., Учпедгиз, 1956.
49. Филонович С. Р. Лучи. Волны. Кванты. М., Наука, 1978.
50. Френкель Я. И. На заре новой техники. Л., Наука, 1970.

Методика преподавания физики

51. Ванеев А. А., Дубицкая З. Г., Ярунина Е. Ф. Преподавание физики в 10 классе. М., Просвещение, 1978.
52. Ванеев А. А., Корж Э. Д., Орехов В. П. Преподавание физики в 9 классе. М., Просвещение, 1980.
53. Глазунов А. Т. Техника в курсе физики средней школы. М., Просвещение, 1977.
54. Горев Л. А. Занимательные опыты по физике. М., Просвещение, 1977.
55. Демкович В. П. Измерения в курсе физики средней школы. М., Просвещение, 1977.
56. Демонстрационные опыты по физике в 6—7 классах средней школы / Под ред. А. А. Покровского. М., Просвещение, 1974.
57. Демонстрационный эксперимент по физике в средней школе / Под ред. А. А. Покровского. М., Просвещение, 1978, 1979, ч. 1, 2.

58. Евсюков А. А. Электронное оборудование по физике. М., Просвещение, 1977.
59. Жерехов Г. И. Политехническое обучение в демонстрационных опытах. М., Учпедгиз, 1957.
60. Каменецкий С. Е., Пустильник И. Г. Электродинамика в курсе физики средней школы. М., Просвещение, 1977.
61. Кац Ц. Б. Биофизика на уроках физики. М., Просвещение, 1974.
62. Кожеуров И. В. Элементы космонавтики в курсах физики и астрономии. М., Просвещение, 1977.
63. Кондаков В. А. Строение и свойства вещества. М., Просвещение, 1970.
64. Марголис А. А., Парфентьева Н. Е., Иванова Л. А. Практикум по школьному физическому эксперименту. М., Просвещение, 1977.
65. Методика преподавания физики в 6—7 классах средней школы / Под ред. В. П. Орехова и А. В. Усовой. М., Просвещение, 1976.
66. Методика преподавания физики в 8—10 классах средней школы / Под ред. В. П. Орехова и А. В. Усовой. М., Просвещение, 1979, ч. 1.
67. Методика преподавания физики в средней школе. Молекулярная физика. Основы электродинамики. М., Просвещение, 1980.
68. Орехов В. П. Колебания и волны в курсе физики средней школы. М., Просвещение, 1977.
69. Подгорнова И. А. Молекулярная физика в средней школе. М., Просвещение, 1970.
70. Покровский С. Ф. Наблюдай и исследуй сам. М., Просвещение, 1966.
71. Попов Г. В. Спектроскопия и цвета тел в курсе физики средней школы. М., Просвещение, 1971.
72. Практикум по физике в средней школе / Под ред. А. А. Покровского. М., Просвещение, 1977.
73. Пустильник И. Г., Угаров В. А. Специальная теория относительности в средней школе. М., Просвещение, 1975.
74. Резников Л. И. Физическая оптика в средней школе. М., Просвещение, 1971.
75. Родина Н. А. Изучение физики атомного ядра в школе. М., Просвещение, 1966.
76. Свитков Л. П. Изучение термодинамики и молекулярной физики. М., Просвещение, 1975.
77. Сердинский В. Г. Экскурсии по физике в средней школе. М., Просвещение, 1980.
78. Усова А. В., Антропова Н. С. Связь преподавания физики в школе с сельскохозяйственным производством. М., Просвещение, 1976.
79. Федотов И. П., Кулина И. Д. Изучение электромагнетизма в курсе физики средней школы. М., Просвещение, 1978.
80. Физика и научно-технический прогресс / Под ред. В. Г. Разумовского, В. А. Фабриканта, А. Г. Глазунова. М., Просвещение, 1980.
81. Фронтальные лабораторные работы по физике в средней школе / Под ред. А. А. Покровского. М., Просвещение, 1977.
82. Чертков И. Н. Эксперимент по полимерам в средней школе. М., Просвещение, 1971.
83. Шахмаев Н. М. Демонстрационные опыты по разделу «Колебания и волны». М., Просвещение, 1974.
84. Шахмаев Н. М., Каменецкий С. Е. Демонстрационные опыты по электродинамике. М., Просвещение, 1973.
85. Шпрокхоф Г. Эксперимент по курсу элементарной физики. Пер. с нем. М., Просвещение, 1960, 1961, 1965, 1967, ч. 3—6.

Научно-популярная литература для учащихся

86. Амальди Дж. Вещество и антивещество. М., Атомиздат, 1969.
87. Брэгг У. Мир света. Мир звука. М., Просвещение, 1967.

88. Булат В. Л. Оптические явления в природе. М., Просвещение, 1974.
89. Карцев В. П. Приключения великих уравнений. М., Знание, 1978.
90. Клюкин В. И. Звук и море. М., Судостроение, 1974.
91. Куприн М. Я. Физика в сельском хозяйстве. М., Просвещение, 1977.
92. Литинецкий И. Б. Бионика. М., Просвещение, 1976.
93. Мухин К. Н. Занимательная ядерная физика. М., Атомиздат, 1969.
94. Мякишев Г. Я. Элементарные частицы. М., Просвещение, 1974.
95. Съезд великих свершений. М., Просвещение, 1977.
96. Хазен А. М. Современная электроника. М., Просвещение, 1970.
97. Шахмаев Н. М. Физические основы телевидения. М., Просвещение, 1970.
98. Школьникам о XXV съезде КПСС / Под. ред. Е. М. Кожевникова. М., Просвещение, 1976.
99. Школьникам о современной физике. Классическая физика. Ядерная физика. М., Просвещение, 1974.
100. Школьникам о современной физике. Физика твердого тела. М., Просвещение, 1975.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Орехов Виктор Петрович, Усова Антонина Васильевна,
Каменецкий Самуил Ефимович, Пустильник Иосиф Григорьевич,
Свитков Леонид Павлович, Усанов Вениамин Владимирович.

МЕТОДИКА ПРЕПОДАВАНИЯ ФИЗИКИ

в 8—10 классах средней школы.

Часть 2

Редактор В. А. Обменина
Переплет художника Н. Г. Блинова
Рисунки художника Е. Н. Рудько
Художественный редактор В. М. Прокофьев
Технический редактор Л. М. Абрамова
Корректор К. А. Иванова

ИБ № 4455

Сдано в набор 28.01.80. Подписано к печати 11.09.80. 60×90¹/₁₆. Бум. типограф. № 2. Гарн. литер. Печать высокая. Усл. печ. л. 22,0+0,25 накидка. Уч.-изд. л. 22,44+0,27 накидка. Тираж 100 000 экз. Заказ № 497. Цена 95 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Просвещение» Государственного комитета РСФСР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли, Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41.

Отпечатано с матриц Саратовского ордена Трудового Красного Знамени полиграфического комбината Росглавполиграфпрома Государственного комитета РСФСР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. Саратов, ул. Чернышевского, 59 на Калининском ордена Трудового Красного Знамени полиграфкомбинате детской литературы им. 50-летия СССР Росглавполиграфпрома Госкомиздата РСФСР. Калинин, проспект 50-летия Октября, 46.

95 коп.



Методика преподавания физики 8·10

